

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**MODELO DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PRECIPITACIÓN  
SOBRE LA INESTABILIDAD DE LADERAS EN EL ÁREA  
METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO**

**POR**

**ING. JUAN JOSÉ AGUILAR DURÁN**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

**NOVIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**MODELO DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PRECIPITACIÓN  
SOBRE LA INESTABILIDAD DE LADERAS EN EL ÁREA  
METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO**

**POR**

**ING. JUAN JOSÉ AGUILAR DURÁN**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

**NOVIEMBRE, 2017**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**Modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre la  
inestabilidad de laderas en el área metropolitana de Monterrey,  
N.L. México**

Por

**Ing. Juan José Aguilar Durán**

Como requisito para obtener el Grado de  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en Ingeniería Ambiental**

VoBo  
Comité de Tesis

---

**Dra. Fabiola D. Yépez Rincón**  
(Director de Tesis)

---

**Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián**  
(Co-Director de Tesis)

---

**Dr. Héctor de León Gómez**  
(Co-Director de Tesis)

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para llevar a cabo mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Civil por el apoyo brindado, las oportunidades de estudio, la beca otorgada, la atención y el servicio prestado, de igual forma mis agradecimientos a todo el personal que labora en esta institución que hizo posible el éxito de este trabajo.

A la Dra. Fabiola D. Yépez Rincón por su asesoría y dirección en este proyecto de tesis, gracias por su apoyo y enseñanza en este crecimiento académico, profesional y personal; también agradezco a la M.C. Nelly L. Ramírez por su apoyo incondicional y asesoramiento en la realización de este trabajo.

Agradezco al comité evaluador el Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián y el Dr. Héctor de León Gómez por sus aportaciones, asesorías y recomendaciones en la tesis.

A mis amigos y compañeros por estar presentes y que hicieron más llevadero y divertido estos dos años de estudio y trabajo en la maestría, gracias por su amistad.

A mi novia por su gran amor y entusiasmo en que pudiera terminar este trabajo de tesis y así poder titularme.

A mi familia que me apoyó para que emprendiera este reto de estudiar la maestría y aunque de lejos, estuvieron presentes.

Agradezco a Dios por la vida, por estar conmigo siempre, por tanta gente buena que pone a mi alrededor y por este gran logro que es gracias a Él.



## **DEDICATORIA**

A mis padres María Arcelia Durán Covarrubias y Juan Aguilar Macías por el don de la vida y por la formación y educación que me han brindado.

A mis hermanos Dilcian Lizeth y Daniel Aguilar Durán por estar conmigo siempre que los necesito, por su gran aprendizaje y por todos los buenos momentos que hemos pasado.

A mis sobrinas Jazmín, Itzel y Dulce mis niñas bonitas y alegres que me consienten y me muestran su cariño.

A todos mis amigos y familiares que han estado ahí cuando los necesito, me han apoyado, han compartido su tiempo conmigo.

A mi novia Aglael Terrazas por quererme tanto, por todos esos buenos momentos que hemos pasado, por estar aquí conmigo y a su mamá Mirthala González por su gran cariño y aprecio.

## Resumen

El crecimiento acelerado de la humanidad repercute en la salud, mortalidad, migración, alimentación, agua potable, urbanización y vivienda por mencionar algunos. En relación con ello, en el último siglo han incrementado los desastres naturales como huracanes, tsunamis, derrumbes, inundaciones, sequías, nevadas, etc., las alteraciones en los patrones de clima perjudica los niveles de precipitación, misma que afecta a las montañas del Área Metropolitana de Monterrey, que se han visto influenciadas por procesos antropogénicos y naturales, ocasionando inestabilidad en las laderas, derivándose en reacomodos y colapsos del terreno, poniendo en riesgo a la población. Este trabajo desarrolla un modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre las laderas en conjunto con los factores topográficos, ambientales y geológicos, para lo cual fue necesario documentar, generar y procesar capas de información de fuentes oficiales. El procedimiento se desarrolló a través de un SIG en el cual se obtuvieron capas vectoriales de pendientes, rumbos, relieve, litología, echados, fallas, edafología, orden hidrológico, cobertura vegetal y precipitación; todos en formato raster y en el mismo sistema de coordenadas para realizar una sobreposición de mapas temáticos. El modelo suma las capas vectoriales reclasificadas que aumentan la probabilidad de deslizamientos. Se complementa la información con datos históricos de eventos de inestabilidad de ladera y con recorridos en campo por las diferentes montañas del área de estudio. El resultado es un mapa que zonifica al área metropolitana de Monterrey en cinco categorías de peligro (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto); encontrando que al menos el 18.92% del área total de estudio se encuentra en zonas de peligro alto y muy alto (101.87 km<sup>2</sup>), lo cual representa una cifra significativa, ya que existen edificaciones en diversas zonas que presentan estas condiciones. Se dan algunas recomendaciones a las autoridades sobre cómo prevenir futuros daños debido a inestabilidad en las laderas.

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>3</b>
1.1.1 Crecimiento demográfico	5
1.1.2 Riesgo, peligro, vulnerabilidad y exposición	6
1.1.3 Desastres Naturales	9
<b>1.2 Inestabilidad de Laderas</b>	<b>10</b>
1.2.1 Situación en México	13
1.2.2 Situación en el Área Metropolitana de Monterrey	15
<b>1.3 Eventos Hidrometeorológicos</b>	<b>17</b>
<b>1.4 Justificación del estudio</b>	<b>19</b>
<b>1.5 Hipótesis</b>	<b>20</b>
<b>1.6 Objetivos</b>	<b>20</b>
1.6.1 Objetivo General	20
1.6.2 Objetivos Específicos	21
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>22</b>
2.1 Estudios realizados por diversos autores	22
2.2 Clasificación de los datos	25
2.3 Sistemas de Información geográfica (SIG)	29
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>32</b>
3.1 Descripción de la zona de estudio	32
3.2 Características de la zona	34
3.2.1 Fisiografía	34
3.2.2 Geología	35
3.2.3 Edafología	37
3.2.4 Hidrología	38
3.2.5 Clima	40
3.2.6 Vegetación	41
3.2.7 Sismicidad	43
3.3 Datos utilizados	44
3.4 Procesamiento de la información	48
3.4.1 Pendientes	48

3.4.2 Rumbos .....	48
3.4.3 Relieve .....	48
3.4.4 Litología .....	49
3.4.5 Fallas .....	49
3.4.6 Echados .....	49
3.4.7 Edafología .....	50
3.4.8 Cobertura vegetal .....	50
3.4.9 Orden hidrológico .....	50
3.4.10 Precipitación.....	51
3.4.11 Recorridos en campo .....	53
3.4.12 Inventario.....	53
3.5 Integración del modelo .....	53
4. RESULTADOS .....	54
4.1 Mapas Generados .....	54
4.1.1 Pendiente.....	54
4.1.2 Rumbos .....	55
4.1.3 Relieve .....	57
4.1.4 Litología .....	58
4.1.5 Edafología .....	59
4.1.6 Echado .....	60
4.1.7 Fallas y Fracturas .....	61
4.1.8 Cobertura vegetal .....	62
4.1.9 Orden Hidrológico .....	63
4.1.10 Estaciones Climatológicas .....	64
4.1.11 Precipitaciones .....	67
4.2 Mapa de Peligro .....	73
4.3 Visitas de Campo.....	76
4.3.1 Cerro del Topo Chico .....	77
4.3.2 Cerro de La Silla .....	79
4.3.3 Cerro de Las Mitras.....	81
4.3.4 Cerro de la Loma Larga .....	84
4.3.5 Sierra Madre Oriental .....	85
4.4 Validación del Modelo .....	87

<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>5.1 Conclusiones.....</b>	<b>89</b>
<b>5.2 Recomendaciones.....</b>	<b>90</b>
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Evolución en el número de desastres naturales por continente durante los últimos 40 años (EM-DAT,2015).....	<b>4</b>
<b>Figura 1.2.</b> Vulnerabilidad de grandes ciudades a amenazas por el clima, 2010. Tomada de Estados de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012 (ONU HABITAT, 2012)...	<b>6</b>
<b>Figura 1.3.</b> Esquema de riesgo, tomado de Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Guevara E., 2006).....	<b>7</b>
<b>Figura 1.4.</b> Deslizamientos, derrumbes, caídos, flujos. Tomada de mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2012).....	<b>11</b>
<b>Figura 2.1.</b> Formatos utilizados en Sistemas de Información Geográfica (Maidmente and Engel, 2002; tomado de Murillo Sánchez, 2002).....	<b>31</b>
<b>Figura 3.1.</b> Ubicación del área de estudio.....	<b>33</b>
<b>Figura 3.2.</b> Ubicación de las montañas en el AMM.....	<b>33</b>
<b>Figura 3.3.</b> Regiones Fisiográficas del país (tomado de INEGI, 2014. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica, Escala 1:1000000).....	<b>34</b>
<b>Figura 3.4.</b> Litología del AMM (tomado del Servicio Geológico Mexicano “Carta Geológico-Minera, Monterrey G-14-7, Nuevo León y Coahuila”, edición 2008).....	<b>36</b>
<b>Figura 3.5.</b> Edafología del AMM (tomado de Mapa Digital de México, INEGI).....	<b>37</b>
<b>Figura 3.6.</b> Cuenca Hidrológica en el AMM (tomado del Anuario Estadístico de Nuevo León. INEGI, 2005).....	<b>38</b>
<b>Figura 3.7.</b> Corrientes y cuerpos de agua en el AMM (tomado del Anuario Estadístico de Nuevo León. INEGI, 2005).....	<b>39</b>
<b>Figura 3.8.</b> Climas en parte del estado de Nuevo León, (Tomado de “Continuo Nacional del Conjunto de Datos de Geográficos de la Carta de Climas” INEGI, 2015).....	<b>41</b>
<b>Figura 3.9.</b> Parte del mapa de Vegetación en el estado de Nuevo León, (Tomado de “Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación” INEGI, 2015).....	<b>42</b>

<b>Figura 3.10.</b> Regionalización Sísmica de México.....	43
<b>Figura 3.11.</b> Diagrama de proceso del modelo.....	47
<b>Figura 3.12.</b> Precipitaciones máximas registradas por mes para diferentes estaciones climatológicas dentro del AMM.....	52
<b>Figura 4.1.</b> Mapa de Pendientes dentro del AMM.....	55
<b>Figura 4.2.</b> Mapa de Rumbos dentro del AMM.....	56
<b>Figura 4.3.</b> Mapa de Relieve dentro del AMM.....	57
<b>Figura 4.4.</b> Mapa de Litología dentro del AMM.....	58
<b>Figura 4.5.</b> Mapa de edafología dentro del AMM.....	59
<b>Figura 4.6.</b> Mapa de echados dentro del AMM.....	60
<b>Figura 4.7.</b> Mapa de fallas y fracturas dentro del AMM.....	61
<b>Figura 4.8.</b> Mapa de Cobertura vegetal dentro del AMM.....	62
<b>Figura 4.9.</b> Tipo de orden en los diferentes cauces y escurrimientos dentro del AMM.....	63
<b>Figura 4.10-a.</b> Ubicación de las estaciones climatológicas dentro del AMM y en sus alrededores en una escala mayor.....	65
<b>Figura 4.10-b.</b> Ubicación de las estaciones climatológicas dentro del AMM y en sus alrededores.....	67
<b>Figura 4.11-a.</b> Precipitaciones máximas registradas en las estaciones climatológicas del AMM, usando el método de interpolación IDW.....	68
<b>Figura 4.11-b.</b> Precipitaciones máximas registradas en las estaciones climatológicas del AMM, usando el método de interpolación Kriging.....	69
<b>Figura 4.12.</b> Intensidad de precipitación para un Tr de 2 años, por estación climatológica dentro del AMM.....	70
<b>Figura 4.13.</b> Intensidad de precipitación para un Tr de 100 años, por estación climatológica dentro del AMM.....	71
<b>Figura 4.14.</b> Intensidad de precipitación para un periodo Tr de 500 años, por estación climatológica dentro del AMM.....	72
<b>Figura 4.15.</b> Intensidad de precipitación para un periodo Tr de 1000 años, por estación climatológica dentro del AMM.....	73
<b>Figura 4.16.</b> Mapa de Peligro por inestabilidad de laderas en el AMM.....	74
<b>Figura 4.17.</b> Mapa de Peligro por inestabilidad de laderas en el AMM.....	75
<b>Figura 4.18.</b> Imágenes de las laderas sur en el cerro del Topo Chico (imagen superior tomada de google Earth, imagen inferior de un vuelo con dron, derecha imagen propia).....	77
<b>Figura 4.19.</b> Mapa de peligro en las laderas sur del cerro del Topo Chico.....	78

<b>Figura 4.20.</b> Laderas en el cerro del Topo Chico.....	79
<b>Figura 4.21.</b> Laderas en el cerro de La Silla (tomada de Google Earth).....	79
<b>Figura 4.22.</b> Mapa de peligro en las laderas norte del cerro de La Silla.....	80
<b>Figura 4.23.</b> Construcción de casas en el cerro de la Silla.....	81
<b>Figura 4.24.</b> Vista panorámica del cerro de Las Mitras.....	81
<b>Figura 4.25.</b> Mapa de peligro en las laderas sur del cerro de Las Mitras.....	82
<b>Figura 4.26.</b> Construcción de casas en el cerro de Las Mitras.....	83
<b>Figura 4.27.</b> Urbanización en las faldas del cerro de Las Mitras.....	83
<b>Figura 4.28.</b> Mapa de peligro en el cerro de la Loma Larga.....	84
<b>Figura 4.29.</b> Urbanización en el cerro de la Loma Larga.....	85
<b>Figura 4.30.</b> Urbanización en las faldas de la Sierra Madre Oriental.....	85
<b>Figura 4.31.</b> Mapa de peligro en las laderas de la Sierra Madre Oriental.....	86
<b>Figura 4.32.</b> Roca expuesta y urbanización en las faldas de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de San Pedro Garza García.....	87
<b>Figura 4.33.</b> Ubicación de los eventos de inestabilidad de ladera reportados dentro del AMM.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Síntesis de daños por desastres en México de 1980 a 1999, por tipo de evento en millones de dólares (Bitrán B. E., 2001).....	4
<b>Tabla 1.2.</b> Datos relativos a eventos catastróficos originados por deslizamiento a nivel mundial, publicados por diferentes fuentes (EM-DAT., 2015; CNN; MOVIMET).....	12
<b>Tabla 1.3.</b> Deslizamientos en México.....	14
<b>Tabla 1.4.</b> Deslizamientos en el Área Metropolitana de Monterrey, datos publicados por diferentes fuentes (Quispe Medina, 2005;Info 7, Milenio, El Norte, MOVIMET).....	16
<b>Tabla 2.1.</b> Valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos (Suárez, 1998. Tomada de Suárez García, 2006).....	25
<b>Tabla 2.2.</b> Valores para los diferentes factores empleados en el SIG, en la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos (tomado de Gülersoy & Çelík, 2017).....	26

<b>Tabla 2.3.</b> Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos (Kanungo, 1993. Tomada de Suárez Díaz, 1998; Suárez García, 2006).....	26
<b>Tabla 2.4.</b> Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple (tomada de González de Vallejo et al. 2002).....	27
<b>Tabla 2.5.</b> Clasificación de los Factores Topográficos (tomado de CENAPRED, 2004)...	27
<b>Tabla 2.6.</b> Clasificación de los Factores Geotécnicos (tomado de CENAPRED, 2004)....	28
<b>Tabla 2.7.</b> Clasificación de los Factores Geomorfológicos y Ambientales (tomado de CENAPRED, 2004).....	29
<b>Tabla 3.1.</b> Valores utilizados en las diferentes capas generadas.....	51
<b>Tabla 4.1.</b> Precipitación máxima registrada en las estaciones climatológicas dentro del AMM y la intensidad de precipitación para diferentes periodos de retorno.....	65
<b>Tabla 4.2.</b> Áreas de cada nivel de peligro en el AMM en km <sup>2</sup> .....	76



## NOMENCLATURA

AMM	Área Metropolitana de Monterrey
CCL	Cónica Conforme de Lambert
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DEM	Digital Elevation Model (modelo digital de elevación)
EIRD	Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres
ENCC	Estrategia Nacional del Cambio Climático
IDW	Inverse Distance Weighted (distancia inversa ponderada)
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (panel intergubernamental sobre cambio climático)
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNH	Programa Nacional Hídrico
RHA	Regiones Hidrológicas Administrativas
SEDESU	Secretaría de Desarrollo Sustentable
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SIG	Sistema de Información Geográfica
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)

## 1. INTRODUCCIÓN

La urbanización es el crecimiento físico de áreas urbanas como resultado de cambios en los patrones de modernización, industrialización y racionalización del uso de suelo (ONU HABITAT, 2012). A nivel mundial, la urbanización presenta niveles acelerados de crecimiento. Por una parte, la percepción de muchos hombres y mujeres, que ven la oportunidad de vivir en una ciudad como el momento de anhelar una mejor vida, tener mayores ingresos, acceso a los servicios públicos, entre otros beneficios (Agenda 2030). Este crecimiento acelerado, sumado a la falta de planeación de las áreas urbanas, trae consigo problemas económicos, impactos en la ecología y el medio ambiente, por mencionar algunos (Naciones Unidas, 2014).

Durante las últimas décadas, un problema que ha venido tomando importancia y es tema para diferentes cumbres, foros y congresos internacionales es el “Cambio Climático”, el que se define, de acuerdo con el IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change), ‘como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables’ (IPPC, 2007) y que son el resultado de diferentes factores naturales, pero también económicos, sociales y políticos.

Las variaciones de la temperatura terrestre han provocado alteraciones en los climas ya establecidos. Ejemplos de eventos extremos generados por los cambios en el clima son: frentes fríos, nevadas, granizo, fuertes ondas de calor y sequías, fenómenos “El niño” y de “La niña”, tornados, precipitaciones más intensas y huracanes (Fedorov, et al. 2010; UNESCO, 2011). Es por ello que parte de la población y dirigentes de diferentes países, han optado por medidas específicas para controlar o disminuir los daños al medio ambiente (ENCC, 2013; Toimil, 2015).

En el caso de los huracanes, el impacto que generan puede inducir desastres, debido a la gran cantidad de lluvia en un periodo menor de tiempo (mm/días), la cual, en ocasiones, es igual o mayor que la precipitación máxima anual (Vázquez Aguirre, 2010; PNH, 2013). Las precipitaciones máximas extremas pueden provocar

inundaciones, derrumbes, deslaves, caídos, encharcamientos, escurrimientos, etc. Estos eventos vulneran a la población, ya que las comunidades pueden sufrir pérdidas de vidas humanas y daños materiales. La vulnerabilidad de la población y su grado de exposición ante estos peligros (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016), aplaza el desarrollo de la región ya que representa un gran peso económico para los gobiernos (Baeza & Ayala, 2003).

Por otro lado, la geomorfología y las condiciones topográficas de las zonas urbanas, pueden contribuir al aumento de esta vulnerabilidad, si se presentan condiciones de inestabilidad (Adame Rivera, 2013; CENAPRED, 2001). Características importantes a considerar son las formaciones geológicas, fallas, fracturas, hundimientos, deslizamientos, caídos, movimientos y colapsos en la superficie, las cuales, si bien existen de manera natural, estas condiciones son más graves cuando se presenta en el área deforestación, intemperismo, erosión, la carga acumulada por la urbanización y otras modificaciones provocadas por la presencia del ser humano en estos lugares (Quispe Medina, 2005).

Por lo tanto, el crecimiento demográfico y la presencia de lluvias torrenciales activan los movimientos de masas, causando desprendimientos y colapsos, ocurriendo el riesgo de afectar seriamente a la población o a la infraestructura del sitio (Murillo Sánchez, 2002; CENAPRED, 2010).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), apoya en la integración de planes de prevención y preparación en caso de desastres y pone empeño en incrementar la conciencia de la prevención de desastres (Centro de Información de las Naciones Unidas, 2016), como una medida de adaptación de las ciudades ante el Cambio Climático. Para ello son necesarias diferentes herramientas que analicen la vulnerabilidad, la exposición de las personas a peligros naturales y su capacidad para resistir a los mismos (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, 2016). La zonificación de los peligros hidrometeorológicos es una medida de adaptación al cambio climático, así también se consideran peligros geológicos que son detonados o incrementados por la intensidad de las precipitaciones; tal es el caso de la inestabilidad de laderas.

Actualmente para el estudio espacial de los fenómenos de remoción de masas se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramienta principal o como una parte del estudio (Adame Rivera, 2013; Quispe Medina, 2005). Los SIG, son una herramienta muy útil para producir y analizar la información; para el manejo, integración, proceso y planificación de los datos, así como la evaluación, modelado y presentación de la información (Guevara E., 2006). Según el modelo, se utilizan rasgos geográficos, aspectos sociales o sistemas de cuantificación, lo que permite que esta herramienta tecnológica cuente con un buen manejo de la información, al igual que excelentes condiciones de capacidad y consulta (Burrough, 1986).

## **1.1 Antecedentes**

En el último siglo se ha notado un aumento en el número de desastres naturales, como son tormentas tropicales, huracanes, tornados, frentes fríos, tormentas de nieve y de granizo, terremotos, fuertes oleadas, tsunamis, derrumbes, deslizamientos de tierra, inundaciones, olas de calor y sequías; según los datos registrados (Munichre, 2015). En la Figura 1.1 se puede observar el incremento de los desastres naturales en las últimas décadas, donde destacan Asia, América y África, con el mayor número de eventos desastrosos (EM-DAT, 2015).

Por otro lado, durante los últimos 20 años se han realizado diversos estudios, en los que se demuestra una relación entre las inundaciones urbanas, y las variaciones de precipitación y temperatura, como consecuencia del Cambio Climático; Naciones Unidas, por ejemplo, confirma que fenómenos extremos como tormentas, vendavales y granizadas son cada vez más frecuentes en áreas urbanas densamente pobladas (Cremonini, et al. 2015).

México no es ajeno a los eventos climáticos extremos; debido a su posición geográfica, fisiografía, variedad de climas, orografía, actividad volcánica y sísmica, por citar algunos de los principales factores que, lo convierten en un territorio sujeto a diversos fenómenos, que pueden ocasionar desastres naturales (Bitrán B. E., 2001).

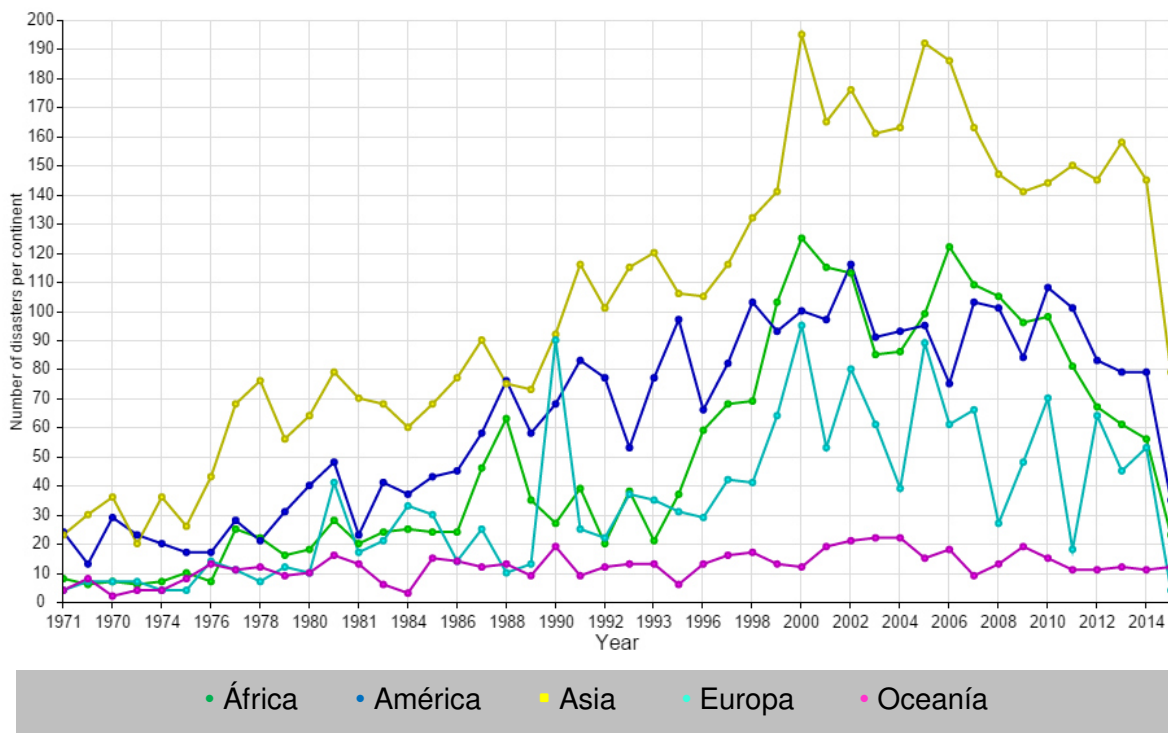


Figura 1.1. Evolución en el número de desastres naturales por continente durante los últimos 40 años (EM-DAT,2015).

En la Tabla 1.1 se destacan los daños por desastres en México para el periodo de 1980 a 1999, en los que se puede observar que los desastres Meteorológicos como: frentes fríos y cálidos, los fenómenos El Niño y La Niña, tornados, tormenta tropical, huracanes, nevada, sequía; y desastres geológicos como: sismos, vulcanismo, deslizamiento o colapso, hundimiento de suelos y algunas de las consecuencias de ellos fueron los más sobresalientes.

Tabla 1.1. Síntesis de daños por desastres en México de 1980 a 1999, por tipo de evento en millones de dólares (Bitrán B. E., 2001).

Tipo de Evento	Muertos	Daños Directos	Daños Indirectos	Total, de Daños
<b>Meteorológicos</b>	2,767	4,402.3	144.9	4,547.2
<b>Geológicos</b>	6,097	4,043.7	516.4	4,560.1
<b>Provocados</b>	1,250	1,1149.7	133.6	1,283.3
<b>Total</b>	<b>10,114</b>	<b>9,595.7</b>	<b>794.9</b>	<b>10,390.6</b>

Los fenómenos naturales en el país dejan una pérdida anual de 100 vidas humanas y aproximadamente 700 millones de dólares, esto en las últimas décadas (CENAPRED, 2001).

### **1.1.1 Crecimiento demográfico**

Según datos de las Naciones Unidas, en 1950 la población mundial era de casi 2,600 millones de personas; para 1987, las estadísticas llegaron a 5 mil millones de habitantes y los 6 mil millones el 12 de octubre de 1999 (Naciones Unidas, 2016). Como se indica en el informe “La situación demográfica en el mundo, 2014”, la población mundial se incrementó a 7,200 millones de personas, en ese año. Las estimaciones marcan un aumento de 82 millones de personas cada año, siguiendo la misma trayectoria, en el 2025 la población mundial será de 8,100 millones y de 9,600 millones de personas en 2050 (Naciones Unidas, 2014).

Más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas (Naciones Unidas, 2014). El crecimiento acelerado de la humanidad genera problemas de diferente índole en todo el mundo. Algunas consecuencias tienen repercusiones en la salud, la mortalidad, las migraciones, la urbanización y vivienda, la alimentación, el agua potable, el cambio climático, las cuestiones sociales, y la lista puede continuar (Naciones Unidas, 2016).

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es el organismo público encargado de la información del país referente al territorio, los recursos, la población y la economía, entre otras cosas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2016). En el censo de 2010, México contaba con 112.3 millones de habitantes; para el 2015, en la encuesta Intercensal, la población fue de 119'530,753 habitantes, de los cuales el 78% vive en zonas urbanas y el 22% en zonas rurales (INEGI, 2016).

En el estado de Nuevo León, para el año 2010, la población era de 4.6 millones de habitantes (Ayuntamiento de Monterrey, 2014), en 2015 las estadísticas marcaban 5'119,504 habitantes, el 95% de su población es urbana y sólo el 5% rural (INEGI, 2016).

### 1.1.2 Riesgo, peligro, vulnerabilidad y exposición

En la región de América Latina, la vulnerabilidad de las ciudades y asentamientos precarios frente a las amenazas del clima, de las epidemias y de la actividad geológica varía por factores externos y por la disposición para afrontarlas. En la Figura 1.2 se observa la vulnerabilidad de grandes ciudades en la región de América Latina (ONU HABITAT, 2012). México se encuentra ubicado en una zona que se ve dañada por diferentes fenómenos naturales y antropogénicos que anualmente causan miles de afectaciones a la población; como daños económicos y pérdida de vidas humanas (Guevara E., 2006; CENAPRED, 2001).

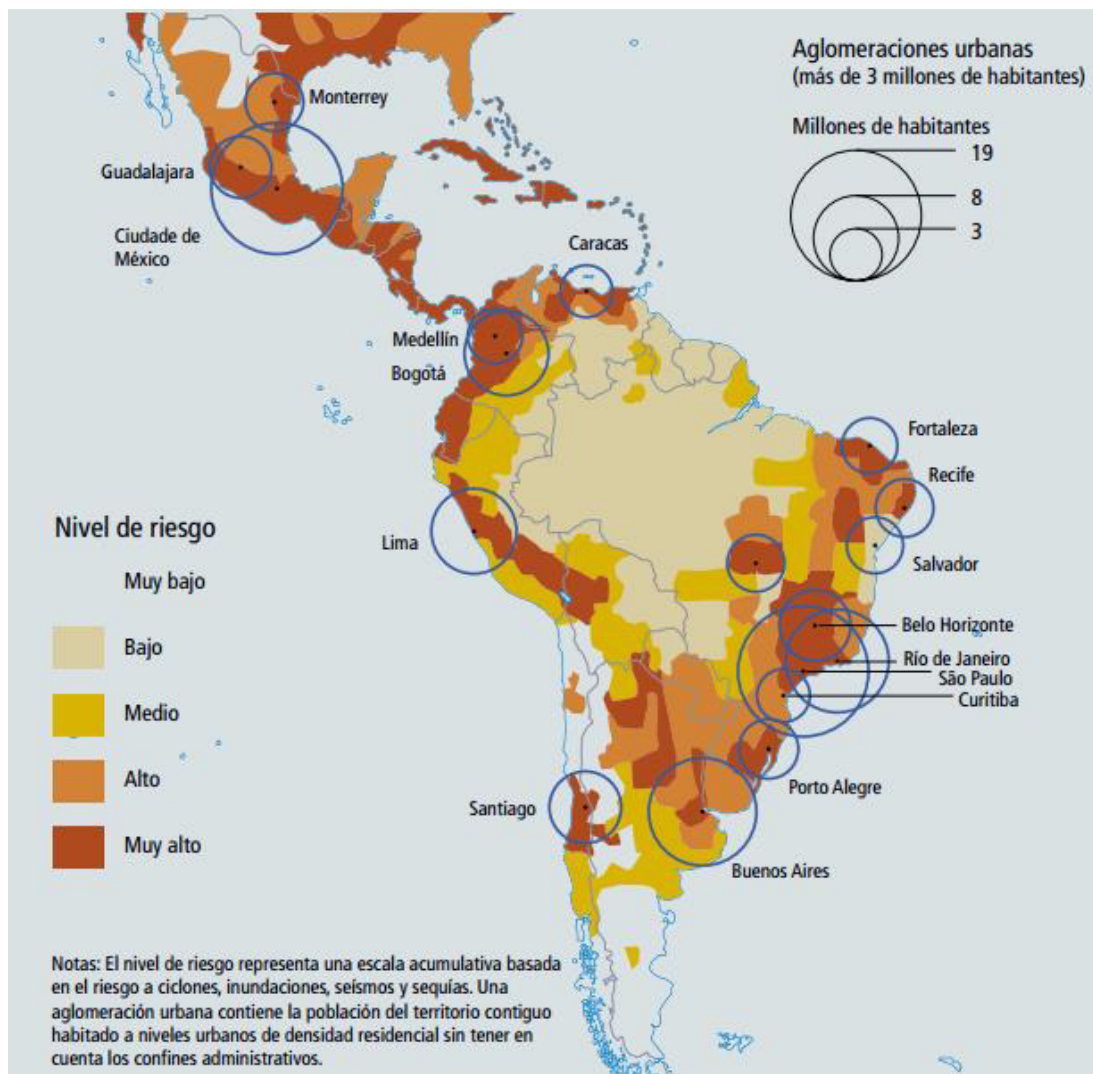


Figura 1.2. Vulnerabilidad de grandes ciudades a amenazas por el clima, 2010. Tomada de Estados de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012 (ONU HABITAT, 2012).

La Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD), hace mención de tres conceptos principales: peligros naturales, vulnerabilidad y riesgo frente a los desastres; con el propósito de informar, mejorar el conocimiento y reducir las pérdidas ambientales, humanas, económicas y sociales (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) comenta que los riesgos están ligados con actividades humanas, y la existencia de éstos puede originarse por algún agente (fenómeno natural o antropogénico), con la habilidad de causar daños a algún asentamiento humano, concluyendo en desastre, como se observa en la Figura 1.3; entendiendo por Riesgo “la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores” (Guevara E., 2006).



Figura 1.3. Esquema de riesgo, tomado de Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Guevara E., 2006).



CENAPRED define el peligro “como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado”; el significado que da a vulnerabilidad es “la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador”, es decir el grado de pérdidas esperadas; la exposición hace referencia a los bienes y sistemas ubicados en un área determinada y que son propensos a ser afectados, puede variar con el crecimiento de la población, y a mayor cantidades expuestas mayor será el riesgo (Guevara E., 2006).

Según la EIRD, la vulnerabilidad está de acuerdo con las acciones y el comportamiento humano; da el grado de resistencia o susceptibilidad de un sistema socioeconómico, a razón del impacto de los fenómenos dañinos. Algunos factores que influyen en la vulnerabilidad son: las condiciones que presentan los asentamientos humanos y la infraestructura, las políticas y la administración pública, y las habilidades organizativas, así como la pobreza. El riesgo es la probabilidad de que un fenómeno suceda. La valoración del riesgo incluye la evaluación de la vulnerabilidad y la predicción del impacto (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016).

El Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey define “Riesgo” como la probabilidad de que un fenómeno perturbador impacte un sistema constituido por personas, generando daños, pérdidas o efectos indeseables; y la “Vulnerabilidad” como la susceptibilidad que presentan los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por los fenómenos perturbadores (Ayuntamiento de Monterrey, 2014).

Para el Programa de las Naciones Unidas, los asentamientos precarios son particularmente vulnerables por su localización, su deficiencia de infraestructura y de servicios, así como por el perfil socioeconómico y cultural de sus habitantes; sin embargo, comenta que se deben tener previsiones y preparación para afrontarlos (ONU HABITAT, 2012).

Mediante la aplicación de esfuerzos de prevención y mitigación se puede reducir el riesgo, utilizando las herramientas al alcance, como las tecnologías, los planes territoriales, mejores prácticas de construcción, informar a la población, etc., la

sociedad puede mejorar sus prácticas y necesidades hacia un desarrollo sostenible (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016; Adame Rivera, 2013).

### **1.1.3 Desastres Naturales**

La región intertropical en la que se encuentra el país y sus características geográficas, benefician la llegada de fenómenos hidrometeorológicos generados en el océano Pacífico y en el Atlántico. Los huracanes presentan varios efectos, como las marejadas y los vientos en las costas y las lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves. Por el contrario, algunas regiones del país se ven afectadas por la escasez de lluvias durante tiempos prolongados dando lugar a sequías; otras regiones se ven afectadas por sistemas invernales. Adicionalmente existen fenómenos como los incendios forestales, y la marea roja, entre otros (CENAPRED, 2001; Guevara E, 2006).

Los desastres generan consecuencias en el ámbito político, económico y social, en el desarrollo de una región; su impacto puede alterar el bienestar y la calidad de vida de sus habitantes. En los años 1980-1999, los efectos causados por los desastres en México alcanzaron, en promedio anual, pérdidas de 500 vidas humanas y daños materiales por 700 millones de dólares (Bitrán D., 2001).

La Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres hace mención al significado de un Desastre Natural, que “se entiende como las consecuencias del impacto de un peligro natural en un sistema socioeconómico con un nivel dado de vulnerabilidad, lo que impide que la sociedad afectada le haga frente a tal impacto” (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016). Incluyendo desastres tecnológicos y ambientales causados únicamente por peligros naturales.

El Sistema Nacional de Protección Civil de México clasifica los agentes perturbadores según el origen que los provoca en: fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, químicos, sanitario-ambientales y socio-organizativos (Guevara E, 2006; CENAPRED, 2001).

Los peligros geológicos son: inestabilidad de laderas; fallas, fracturas y hundimientos; deslizamientos y caídos; incendios subterráneos en paleolagos (turberas); colapso de cavernas en zonas kársticas; flujo de lahares volcánicos; flujos de lodo; y erosión. Los peligros Hidrometeorológicos son: inundación, encharcamiento y escurrimientos torrenciales. Los peligros antropogénicos son: químicos, sanitario-ambientales y socio-organizativos (CENAPRED, 2012; Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, 2012).

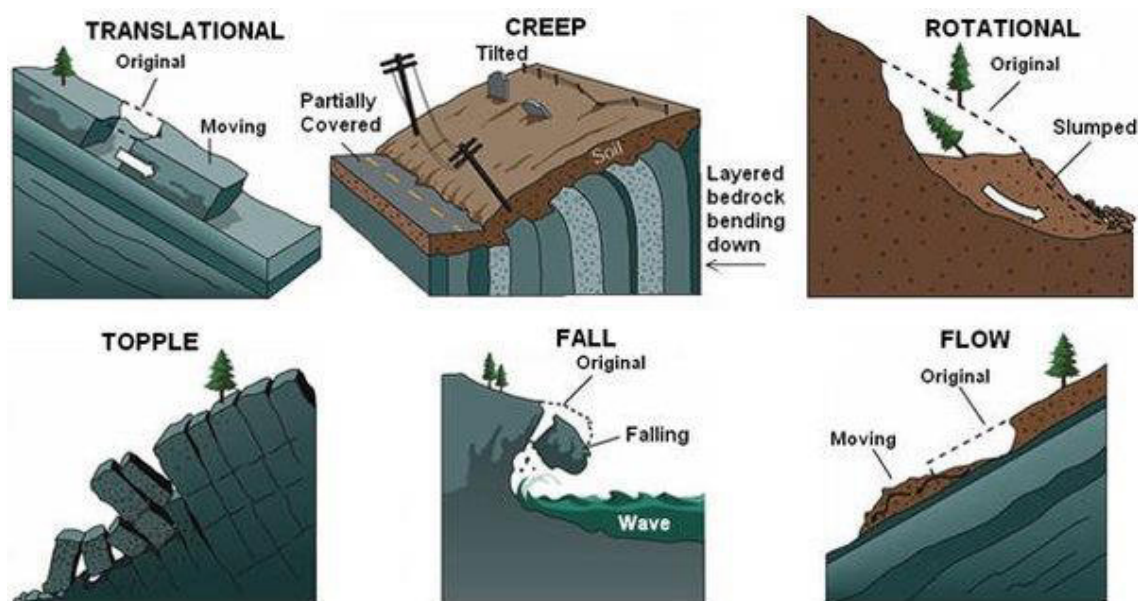
Los fenómenos geológicos son en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior o de la superficie de la Tierra, y pueden clasificarse en: sismicidad, vulcanismo, tsunamis, movimientos de laderas y suelos. Estos fenómenos han estado presentes a lo largo de la historia geológica del planeta y seguirán presentándose en condiciones similares (CENAPRED, 2001).

## **1.2 Inestabilidad de Laderas**

Algunos riesgos geológicos son los deslizamientos, o movimientos de masa, los cuales se producen a lo largo de una superficie de rotura bien definida, y por lo general, suceden pérdidas de vidas humanas y materiales (Quispe Medina, 2005). La ocurrencia de los deslizamientos es consecuencia de un complejo campo de esfuerzos que está activo en una masa de roca o de suelo en la pendiente, los dos parámetros más determinantes son: un incremento en el esfuerzo de corte y una disminución en la resistencia del material (Van Westen, 1999).

Las zonas montañosas al verse afectadas por la erosión, los deslizamientos previos, los cortes de carreteras y las canteras, en los soportes laterales; de igual manera el incremento de carga como el peso de fuertes, intensas y prolongadas lluvias, el relleno para edificación u otro y la vegetación; presiones laterales hidráulicas, raíces de vegetación, arcillas expansivas; esfuerzos transitorios por terremotos, vibraciones de camiones, maquinaria, explosiones, etc.; movimientos geológicos, provocan un incremento del esfuerzo de corte (Quispe Medina, 2005).

La inestabilidad de laderas es un proceso de pérdida de la capacidad del terreno natural para autosustentarse, derivándose en reajustes y colapsos del terreno, causada por los esfuerzos que se desarrollan en la superficie de las mismas (CENAPRED, 2010; SEDESU, 2010). Estos procesos se originan en zonas donde la pendiente es pronunciada, y se presenta en diferentes formas, como lo muestra la Figura 1.4. Los fenómenos meteorológicos y las perturbaciones por actividades humanas propician volteos, caídos, deslizamientos y flujos que alteran las laderas y crean zonas de peligro para todo lo que se ubique en la parte baja (CENAPRED, 2010; CENAPRED, 2012).



*Figura 1.4. Deslizamientos, derrumbes, caídos, flujos. Tomada de mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2012).*

Entre los tipos de movimiento de la superficie del terreno natural se encuentran:

- 1) Inestabilidad de laderas naturales.
- 2) Flujos de lodo y escombros.
- 3) Hundimiento regional y local.
- 4) Agrietamiento del terreno.

La inestabilidad del terreno natural ocurre en zonas montañosas, con superficies de gran inclinación; el grado de inestabilidad está relacionado con el origen geológico. Los flujos de lodo y escombros se pueden presentar con el agua de lluvias

extraordinarias al saturarse y se identifican como ríos de material térreo. El hundimiento regional se encuentra asociado con la extracción de agua subterránea, manifestando un descenso de la superficie del terreno natural. El agrietamiento de la superficie del terreno ocurre por el hundimiento regional y se manifiesta en desplazamientos verticales y horizontales del subsuelo en un área. Los hundimientos locales son causados por el colapso de la superficie del terreno natural, en zonas donde existen cavidades subterráneas (CENAPRED, 2001).

La Unión Europea ha determinado en diversos estudios de uso de suelo que las inundaciones y los deslizamientos de tierras se producen en zonas con suelos altamente erosionables, pendientes escarpadas e intensas lluvias. Como ejemplo, la Tabla 1.2, enlista una serie de países que se han visto afectados debido a deslizamientos de tierras.

*Tabla 1.2. Datos relativos a eventos catastróficos originados por deslizamiento a nivel mundial, publicados por diferentes fuentes (EM-DAT., 2015; CNN; MOVIMET).*

<b>País</b>	<b>Año</b>	<b>Daños</b>
<b>Perú</b>	1941	Deslizamiento deja 5 mil víctimas
<b>Unión Soviética</b>	1949	Deslizamientos dejan 12 mil víctimas
<b>México</b>	1959	Deslizamientos dejan más de 5 mil víctimas
<b>Honduras</b>	1973	Deslizamientos dejan 2800 víctimas
<b>Afganistán</b>	1995	Deslizamiento deja 35 víctimas
<b>India</b>	1995	Deslizamiento deja 400 víctimas
<b>Francia</b>	2014	Desprendimiento de roca descarrila tren en los Alpes
<b>Italia</b>	2014	Caen rocas de montaña causando destrucción
<b>Guatemala</b>	2015	Sigue en aumento la cifra de muertos por alud
<b>China</b>	2015	Decenas de desaparecidos tras deslizamientos de tierra
<b>Brasil</b>	2016	Al menos 15 muertos por deslizamientos y fuertes lluvias
<b>Colombia</b>	2016	Varios muertos por deslizamientos

En la Tabla anterior se pueden notar algunos casos importantes de deslizamientos en diferentes países, y como ha cobrado la vida de miles de personas en todo el mundo. Cabe señalar que varios países siguen generando deslizamientos y pérdidas de vida año con año.

Algunos estudios referentes a los distintos casos de deslizamiento comentan que las regiones alpinas y mediterráneas han sufrido diversos deslizamientos, afectando a Italia en más del 50% del territorio y al 60% de la población; sumándole otros problemas junto al deterioro debido a la contaminación, los cambios en el clima, el uso del suelo y otras actividades humanas (Serrano, 2007).

El aumento de eventos de inundaciones urbanas y derrumbes, debido a la gran cantidad de tormentas breves e intensas; sugieren que el aumento de inundaciones urbanas puede llegar a ser aún más relevante en el futuro cercano (Cremonini, et al. 2015).

Investigaciones para las áreas de la región metropolitana de Vancouver, Columbia Británica, Canadá, argumentan que los deslizamientos de tierra pueden tener un impacto negativo en el ambiente de los individuos y sus comunidades. Reducir al mínimo estos impactos depende de la identificación eficaz de las áreas de riesgo mediante un proceso de análisis de la susceptibilidad (Dragicevic, et al. 2014).

Los datos publicados por el Instituto Geológico y Minero de España en 1987, en comparación y actualizado de Ayala (1987), Suárez (1997), sobre el impacto económico y social de los riesgos geológicos en España, estiman que para el periodo 1986-2016, la previsión de pérdidas potenciales en España, únicamente por deslizamientos, es de aproximadamente 9,1 mil millones de euros, para una hipótesis de riesgo medio (Jiménez-Perálvarez, 2012).

### **1.2.1 Situación en México**

El territorio mexicano presenta condiciones orográficas, climatológicas, de tipos de formaciones geológicas y de explosión demográfica que, en unión con el intemperismo y la erosión de la zona originan problemas relacionados con la inestabilidad y el colapso de laderas naturales; Lo anterior constituye una amenaza, particularmente para las poblaciones que están asentadas en antiguos deslizamientos de laderas naturales o en zonas minadas. Existe el riesgo de que ante la presencia de lluvias se activen los movimientos, los desprendimientos y los colapsos, que afecten seriamente a la población (CENAPRED, 2001).

El huracán Pauline, en octubre de 1997, provocó cuantiosos movimientos de materiales térreos (caídos de rocas y flujos de lodo y escombros), ocasionados por la saturación, y los colapsos de zonas altas con fuertes pendientes, provocando pérdida de vidas humanas, bienes materiales, infraestructura y servicios en las costas de Guerrero y Oaxaca (CENAPRED, 2001).

Los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz se vieron afectados a causa de una depresión tropical en octubre de 1999, ocasionando inundaciones y colapsos de laderas naturales, perjudicando distintas zonas pobladas (CENAPRED, 2001).

La Sierra Norte de Puebla presentó cientos de movimientos de tierra, como deslizamientos y flujos en octubre de 1999; a causa de la intensa lluvia, afectando a varios municipios y dejando cuantiosas pérdidas en diversos sectores (Baeza & Ayala, 2003). En la Tabla 1.3 se muestran algunos casos de deslaves y derrumbes a causa de lluvias o inundaciones dentro de México.

*Tabla 1.3. Deslizamientos en México.*

Estado	Año	Daños	Referencia
<b>Baja California</b>	1993	Intensas lluvias provocan inundaciones y deslaves en Tijuana en 1993 y en 2010.	(Bocco, Sánchez, & Ricmann, 1993), (García Gómez, 1998)
<b>CDMX</b>	1995	El crecimiento urbano en zonas peligrosas y las precipitaciones han ocasionado deslaves y colapsos e inundaciones generando daños.	(Lugo Hubp, Cordero Estrada, & Zamorano Orozco, 1995)
<b>Guerrero</b>	1997	El huracán Paulina categoría 4 afectó las costas de Chiapas, Guerrero y Oaxaca, provocando derrumbes, inundaciones y la muerte de más de 120 personas.	(Matías Ramírez, 1998)
<b>Jalisco</b>	1997	Intensa precipitación generó flujos de lodo y rocas afectando fraccionamientos residenciales y varias hectáreas de cultivos.	(Jaimes Téllez, Niño Lázaro, Reinoso Angulo, Avelar Frausto, & Huerta Garnica, 2008)
<b>Oaxaca y Chiapas</b>	1998	Deslizamientos y flujos por causa de una tormenta tropical provocaron la muerte de 214 personas y 307 desaparecidos.	(Jaimes Téllez, Niño Lázaro, Reinoso Angulo, Avelar Frausto, & Huerta Garnica, 2008)
<b>Puebla</b>	1999	Lluvias torrenciales de 1999, 2005 y 2007 han desencadenado deslizamientos de laderas. Pérdidas humanas y daños cuantiosos.	(Cuanalo C., Quezada P., Aguilar M., Oliván R., & Baradona D., 2006)
<b>Tabasco</b>	2007	Inundaciones por fuertes lluvias provocaron deslaves	(Perevochtchikova & Lezama de la Torre, 2010)

Continuación de la Tabla 1.3

<b>Chiapas</b>	2007	Condiciones anómalas de precipitación durante octubre y principios de noviembre 2007 provocan deslaves.	(Hinojosa Corona, Rodríguez Moreno, Munguía Orozco, & Meillón Menchaca, 2011)
<b>Chihuahua</b>	2008	Precipitaciones ocasionaron derrumbes, inundaciones generando daños en la población e infraestructura.	(Jaimes Téllez, Niño Lázaro, Reinoso Angulo, Avelar Frausto, & Huerta Garnica, 2008)
<b>Nuevo León</b>	2010	Deslizamientos, flujo, caídos, inundaciones, entre otros a causa del Huracán Alex	(CENAPRED, 2012)
<b>Guerrero</b>	2015	El Huracán Ingrid y la tormenta tropical Manuel provocaron derrumbes e inundaciones en vialidades y diversas poblaciones.	(Palacios Ortega, Martínez García, & Gutierrez Ávila, 2015)

Fuertes lluvias, crecidas de ríos, e inundaciones han provocado deslaves y derrumbes en varias zonas dentro del país; en México gran parte de las poblaciones se encuentran expuestas a peligros naturales, la mayoría de los datos se encuentran registrados en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres, sobre las personas que habitan zonas de riesgo (Adame Rivera, 2013), se han realizado estudios, en los cuales han previsto las variaciones de las precipitaciones en el clima de México, y cómo afectan en los procesos de remoción en masa, ocasionando daños materiales y pérdidas humanas (Alcántara- Ayala, 2002; Méndez, 2008).

### 1.2.2 Situación en el Área Metropolitana de Monterrey

Algunos autores comentan que dentro del AMM el peligro ocasionado por precipitaciones extremas y remociones en masa ha ido al alza en los últimos años, esto como consecuencia de las precipitaciones extremas que se han transformado en un fenómeno meteorológico trascendental en la ciudad, por su irregularidad, frecuencia e intensidad, causando daños materiales (Adame Rivera, 2013). En la Tabla 1.4, se muestran algunos ejemplos de deslizamientos en el AMM, en los últimos años.



*Tabla 1.4. Deslizamientos en el Área Metropolitana de Monterrey, datos publicados por diferentes fuentes (Quispe Medina, 2005; Info 7, Milenio, El Norte, MOVIMET).*

Referencia	Fecha	Daños
San Pedro Garza García	Sep-88	Desprendimiento y rodamiento de bloques de roca en Chipinque a causa de un huracán.
San Pedro (Sierra Madre Oriental)	Oct-00	Deslaves en diversas colonias de San Pedro contiguas a la Sierra Madre debido a precipitaciones.
Santa Catarina (Sierra Madre oriental)	Sep-02	Derrumbes en la Carretera hacia Saltillo
San Pedro (Sierra Madre Oriental)	Sep-03	Deslaves en la Sierra debido a las precipitaciones.
Monterrey (Cerro de la Loma Larga)	Sep-03	Derrumbe de una barda en la colonia Independencia debido a las precipitaciones, un niño resulto herido.
Monterrey (Cerro de las Mitras)	Sep-03	Derrumbe parcial de 2 residencias, edificio multifamiliar se vio afectado por lluvias y una falla geológica
Monterrey (Cerro de las Mitras)	Jul y Sep-05	Deslizamientos en la ladera ocasionaron grietas en edificios.
Monterrey (Col. Alfonso Reyes)	22-jun-07	Desprendimientos de rocas afectaron a dos casas habitación.
Monterrey (Cerro del Topo Chico)	24-sep-08	Fuertes lluvias ocasionaron desprendimientos de rocas del cerro en la colonia Salvador Allende.
Monterrey (Cerro de la Campana)	09-jul-10	Las colonias mostraban severos desgajamientos de tierra.
Monterrey (Cerro de las Mitras)	09-jul-10	Deslizamiento de toneladas de piedra, lodo y basura bloquearon la circulación de vehículos.
Monterrey (San Jerónimo)	18-sep-13	10 toneladas del cerro de las Mitras se deslizaron dañando edificios y vialidades.
Monterrey (Topo Chico)	10-ene-14	Se desprende piedra de varias toneladas y daña casas de vecinos del cerro del Topo Chico.
San Pedro (Col. Joya de la Corona)	02-feb-15	Deslave por lluvias provoca cierre en la vialidad.
San Pedro (Cerro de la Corona)	17-feb-15	Deslave destruyo muro de contención afectando a vecinos.

Quispe Medina (2005), enumera una serie de fenómenos en el AMM registrados por la prensa, los cuales ocasionaron pérdidas materiales: Rachas de fuertes vientos ocasionaron que rocas de gran dimensión cayeran sobre el kilómetro 54 de la carretera de cuota Reynosa-Monterrey (julio 1995); deslaves en los sectores de Olinalá y Colonial de la Sierra, además del Parque Ecológico Chipinque, que cerró por buen tiempo, ocasionado por intensas lluvias (octubre 2000); deslizamientos e inundaciones en zonas residenciales contiguas a la Sierra Madre, como consecuencias del choque de los restos del huracán "Keith" (octubre 2000); derrumbes en la carretera hacia Saltillo (septiembre 2002); desastre ocurrido en la

zona de Las Lajas, en el Cerro de las Mitras (septiembre 2003), asociado a lluvias y una falla geológica, y que afectó a un edificio multifamiliar de 8 pisos; el derrumbe parcial de dos residencias en el Cerro de las Mitras, en la Colonia Cima de las Lajas; el derrumbe de una barda en el Cerro de la Loma Larga, en la colonia Independencia, donde un niño resultó con lesiones leves, y deslaves en la Sierra, en San Pedro (septiembre 2003); el fraccionamiento Colinas de San Jerónimo en el Municipio de Monterrey (julio y septiembre 2005), ha ocasionado grandes pérdidas económicas que llegan hasta la demolición de los edificios denominados como Torres de San Jerónimo (Quispe Medina, 2005).

En notas más actuales de prensa, se informa sobre deslizamientos por fuertes lluvias y pérdidas materiales, como los siguientes casos: en el Cerro de la Campana en la ciudad de Monterrey en el 2010, decenas de familias fueron evacuadas de su casa por desgajamientos de tierra; ese mismo año en el Sector Cumbres, en Monterrey, escurrimientos del Cerro de las Mitras, ocasionaron el deslizamiento de toneladas de piedra, lodo y basura; en 2013 en el Cerro de las Mitras, hubo deslizamiento de toneladas de piedra a causa de recientes lluvias; la colonia Unidad Pedreras de la ciudad de Monterrey, se vio afectada por el desprendimiento de varias rocas del Cerro del Topo Chico, en 2014, provocando daños en algunas de las casas.

Un fenómeno meteorológico de gran magnitud dentro del AMM en los últimos años fue el huracán Alex, el cual provocó severas inundaciones y remociones en masa en diferentes zonas en riesgo (CENAPRED, 2012; Adame Rivera, 2013).

### **1.3 Eventos Hidrometeorológicos**

De manera global, los impactos hidrometeorológicos han ido aumentando anualmente, debido a cambios en el clima (Yepez Rincón, et al. 2013). La región intertropical en la que se encuentra el país, y sus características geográficas, benefician la llegada de fenómenos hidrometeorológicos generados en el océano Pacífico y Atlántico, como ciclones tropicales, frentes fríos, entrada de aire húmedo,

etc., los cuales originan lluvias intensas que a su vez suscitan inundaciones, deslaves, derrumbes, entre otros (CONAGUA, 2011).

Anualmente se originan, en promedio 25 huracanes, afectando las zonas costeras y gran extensión en territorio adentro; en promedio 4 o 5 huracanes, suelen causar daños severos a la población. Los huracanes presentan varios efectos como las marejadas y vientos en las costas, lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves (Guevara E., 2006; CENAPRED, 2001). En México, de acuerdo con la información del Servicio Meteorológico Nacional, los ciclones que han impactado al país en los últimos 60 años son 272; 70% provenientes del océano Pacífico y 30% del Atlántico.

Uno de los objetivos del Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (PNH), es “Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones” para ello pretende minimizar la vulnerabilidad de los asentamientos humanos, logrando eludir las pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura a causa de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (CONAGUA, 2013).

Los peligros hidrometeorológicos son causados por la acción del agua y del viento, que ocasionan daños a la población en sus personas, bienes y actividades de todo tipo. Según CENAPRED, se clasifican en: inundaciones que se generan cuando la intensa precipitación causa un flujo de agua superior a la capacidad del cuerpo de captación, lo que provoca el desbordamiento de ríos y arroyos, los asentamientos humanos que se ubican a los lados de los cauces son susceptibles a inundarse por el desbordamiento lateral de los cuerpos mencionados. El encharcamiento es un fenómeno causado por la saturación del suelo, caracterizado por la permanencia de agua sobre la superficie, en función del tiempo y la cantidad de la precipitación. El encharcamiento es característico de las zonas planas o moderadamente onduladas. (CENAPRED, 2010; Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, 2012).

La lluvia, el deshielo o la combinación de estos fenómenos genera la mayoría de los deslizamientos. En el macizo rocoso, el agua y el hielo penetran en las grietas y producen presión hidrostática; en los suelos, ocasionan el incremento de la presión

de los poros y reducen la resistencia tangencial. Las tormentas que producen lluvias intensas durante períodos cortos o largos desencadenan cuantiosos deslizamientos; el paso de la lluvia puede proporcionar valores de predicción y advertencia acerca de eventos de deslizamientos. Las lluvias intensas causan deslizamientos de muchos tipos (Quispe Medina, 2005).

Existe un amplio campo de acción para reducir el riesgo mediante la aplicación de esfuerzos de prevención y mitigación, basados, por ejemplo, en la tecnología moderna empleada para pronosticar el tiempo, en términos de desarrollo de sistemas de alerta temprana y de la puesta en práctica de mejores planes de utilización territorial en los asentamientos y las prácticas de construcción, siempre y cuando las sociedades se aseguren de que la aplicación de estas prácticas sea consistente con las necesidades del desarrollo sostenible (Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres, 2016).

Los eventos de inestabilidad de laderas (derrumbes, deslizamientos y caídos) son motivo de investigación en este trabajo, dentro del área metropolitana de Monterrey (AMM). En el presente estudio se pretende determinar si algunos fenómenos naturales tales como los huracanes, las lluvias intensas, las tormentas tropicales, etc., son elementos principales para provocar inestabilidad en las laderas, fuente de afectación para las zonas aledañas, o si representan un factor que puede influir como zona de riesgo dentro del área de estudio; partiendo de la realización de un modelo de Sistema de Información geográfico (SIG).

#### **1.4 Justificación del estudio**

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) anunció, como consecuencia del cambio climático en los últimos años, un incremento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos para algunas regiones de México, la región de Norteamérica y para el planeta en su conjunto (WMO, 2004; Vázquez Aguirre, 2010).

La base de datos creada por *The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (EM-DAT, 2015) a partir de bases de datos preexistentes y de nuevos datos, ha contabilizado, para el período 1900-2001, que los deslizamientos u otros procesos relacionados con ellos han provocado un total de 64,088 víctimas en 364 grandes eventos; sin embargo, se debe tener en cuenta que la mayoría de los registros corresponden a las tres últimas décadas (Bonachea Pico, 2006).

Identificar las áreas no urbanizables, ya sea por causa de preservación ecológica, por prevención de riesgos o por tener pendientes mayores al 45% (Ayuntamiento de Monterrey, 2014). El área en estudio, por su ubicación geográfica, distribución morfológica y geológica asociada con las diferentes unidades estratigráficas que afloran, presenta características propias que la hacen vulnerable en algunas zonas; es por ello que este estudio es de importancia para localizar los sitios con mayor riesgo y peligro, en los que las autoridades pertinentes deben realizar obras de protección para evitar pérdidas humanas, económicas y sociales, así como, poner mayor atención en sitios deshabitados, pero que son propensos a peligros, para evitar ahí futuros asentamientos humanos.

## **1.5 Hipótesis**

Al evaluar las precipitaciones dentro del Área metropolitana de Monterrey, en un modelo de inestabilidad de laderas, se podrá demostrar el grado de influencia de la lluvia como factor detonante y se permitirá complementar un modelo SIG que ayude a predecir las zonas de riesgo y peligros geológicos, para evitar afectaciones futuras.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo General**

- Desarrollar un modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre la inestabilidad de laderas, considerando las precipitaciones máximas

influenciadas por los eventos hidrometeorológicos, los factores topográficos, ambientales y geológicos del Área Metropolitana de Monterrey.

### **1.6.2 Objetivos Específicos**

- Documentar, generar y procesar capas con los datos oficiales de topografía, geología, uso de suelo y precipitación, entre otros factores que afecten la inestabilidad de laderas.
- Procesar los datos históricos de las estaciones meteorológicas automáticas y las estaciones climatológicas más cercanas al área de estudio para obtener los valores máximos de precipitación.
- Generar escenarios con base en la integración de intensidad de precipitación y las otras capas de información.
- Desarrollar un Modelo SIG con la información topográfica, ambiental y geológica del Área Metropolitana de Monterrey, para localizar los sitios con inestabilidad de laderas.
- Validar la información obtenida con fuentes históricas de diferentes eventos de derrumbes dentro del AMM.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Estudios realizados por diversos autores**

Algunos autores exponen la importancia de estudios sobre susceptibilidad, riesgo, peligro, y los planes de ordenación urbana, para delimitar las zonas de riesgo, ya que para ello se han generado cartografías de riesgos naturales, modelos de susceptibilidad y peligro, utilizando diferentes métodos, creando niveles de riesgos, según el método ejercido; realizando digitalización de mapas, suma de matrices, capas vectoriales, sobreposición de mapas e inventario de movimientos, entre otros (Bonachea Pico, 2006; Suárez García, 2006; Jiménez-Perálvarez, 2012).

Se deben emplear diversos factores condicionantes como la topografía del terreno, a través de su altitud, pendiente, orientación y curvatura; la cobertura vegetal o uso de suelo, densidad de árboles, tipo de vegetación, áreas urbanas; la geología como la composición de suelos, rocas y su estructura; las condiciones hidrológicas, como los escurrimientos, la saturación por infiltración, la socavación, la distancia a los cauces, la red de drenaje y las obras hidráulicas; además los movimientos sísmicos y los factores antropogénicos, entre otros elementos que, permiten evaluar los diferentes criterios y pronosticar el comportamiento del proceso (Bonachea Pico, 2006; Suárez García, 2006).

El método empleado en la mayoría de los casos es mediante un SIG; en algunos casos se digitalizaron las capas de información proyectando las zonas representativas, proporcionando valores a las zonas, partiendo de una base de datos, se le otorgaron clases, colores y símbolos para representarlos visualmente. A partir de ello se realizó una sobreposición espacial de las capas; se sumó gráficamente, fusionando entre si las capas de información, distribuyendo sus valores, zonas y límites. Posterior a ello se sumaron los valores, obteniendo la susceptibilidad (Suárez García, 2006).

Suárez Díaz (1998) realizó estudios para determinar una guía para el estudio de los deslizamientos y la estabilidad de los taludes, así como la práctica de la ingeniería en el proceso. Es necesario zonificar la amenaza de riesgo; ésta puede ser a través

de mapeo de deslizamientos, considerando el mayor número de factores que pueden influir en los deslizamientos, asignando valores y dando un peso a los factores, o con inventario de ellos, los cuales pueden realizarse por medio de análisis de fotografías aéreas y digitalizándolos, dando una libertad en los pasos a seguir y considerando el criterio de los expertos (Suárez Díaz, 1998).

CENAPRED (2004) comenta una estrategia de prevención en tres pasos; identificar los peligros y amenazas, determinar las características y los niveles de riesgo, y diseñar acciones y programas para disminuir los riesgos. Esto se puede llevar a cabo conociendo los tipos de deslizamientos que se presentan, percibiendo los factores que los causan (topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales), haciendo reconocimiento en campo, elaborando mapas de inventario, de peligro y de riesgo en los cuales se asignen valores, de acuerdo con el grado de amenaza que presente, desde muy baja hasta una muy alta; estimando la magnitud del evento, los elementos de riesgo y la vulnerabilidad (CENAPRED, 2004).

Quispe Medina (2005) utilizó los SIG para generar un mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, empleando datos de tipo geomorfológico, topográficos, geológicos, hidrológicos y de uso de suelo; empleando métodos de diferentes autores, ordenó los mapas en clases, partiendo de diferentes factores; calculó valores ponderados y los asignó a los diferentes mapas; realizó una superposición de mapas de factores en conjunto al mapa de deslizamientos y determinó los niveles de susceptibilidad; partiendo de la base de datos; calculó la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Quispe Medina, 2005).

Suárez García (2006) calculó la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos por medio de datos históricos en el área de estudio, utilizando métodos empíricos basados en correlación con sistemas de clasificación en estabilidad de taludes, uso de evidencia geomorfológica, datos históricos, relación entre frecuencia e intensidad de eventos detonantes como lluvias o sismos. Siguiendo el criterio de otros autores, usó cinco niveles de susceptibilidad: muy alta, alta, media, baja y muy baja; creando un mapa de susceptibilidad a deslizamientos, mediante la sobreposición de mapas y el uso de un software (Suárez García, 2006).



Bonachea Pico (2006) examinó los datos históricos de frecuencia y magnitud de los deslizamientos, estimó la vulnerabilidad, elaboró modelos de riesgo con diferentes variables (Modelo digital de elevación, de orientaciones, pendientes, insolación, cauces, fallas, litología, uso de suelo y espesor de regolito), creando modelos de susceptibilidad y de peligrosidad; para ello empleo una resolución de 10 x 10 metros en toda la zona de estudio y en zonas específicas, usó una resolución de 1 x 1 metro, obteniendo con ello una calidad superior y un incremento en la cantidad de información para trabajar (Bonachea Pico, 2006).

Hernández Mena (2008) determinó la susceptibilidad de los procesos de remoción en masa a través de movimientos ya conocidos, desarrollando un inventario, y los diferentes factores que influyen, por medio de un análisis estadístico multivariado simple y discriminante, utilizando un software y un SIG, obteniendo un mapa de susceptibilidad, validándolo con los deslizamientos existentes (Hernández Mena, 2008).

Saha y colaboradores (2010) elaboraron zonas de riesgo por deslizamiento de tierra, utilizando diferentes factores para la proyección de mapas, datos de sensores de satélites y visitas de campo; a través de un SIG, las distintas capas de datos generados deberían estar en formato raster y empleo buffer en algunas capas, se analizaron los datos y se les asignó un valor ponderado para obtener un índice de peligro de deslizamiento de tierra, clasificándolos en diferentes escalas de riesgo (muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto). Con los datos de campo se evaluó y validó la información obtenida, dando como resultado un mapa de riesgo (Saha A. k., 2010).

Jiménez Perálvarez (2012) determinó la susceptibilidad referente a los movimientos de laderas para los cuales realizó algunas prácticas como: un inventario de los movimientos de ladera en su área de estudio; desarrolló el mapa de susceptibilidad por medio de un SIG, investigó la frecuencia de ocurrencia de los movimientos o la probabilidad de rotura del talud, también examinó los factores desencadenantes para obtener un mapa de peligro por movimientos de ladera (Jiménez-Perálvarez, 2012).

Adame Rivera (2013) investigó el área de estudio para determinar los peligros a los procesos de remoción en masa por precipitaciones extremas. Elaborando cartografías de zonas de alto riesgo en un SIG con diferentes factores involucrados y datos de campo, determinó la vulnerabilidad de la zona (Adame Rivera, 2013).

## 2.2 Clasificación de los datos

En este apartado se muestran diversas tablas, donde se observan algunas clasificaciones que manejan diferentes autores en relación con los factores que pueden influir en la inestabilidad de las laderas, de las cuales se toman las clasificaciones para el método de este proyecto. En la Tabla 2.1 se presentan los factores involucrados en la evaluación de la susceptibilidad de los deslizamientos y su grado de afectación, utilizada por Suárez García (2006), en su trabajo de susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental.

*Tabla 2.1. Valoración de factores para evaluación de susceptibilidad a deslizamientos (Suárez, 1998. Tomada de Suárez García, 2006).*

<b>Factor</b>	<b>Característica</b>	<b>Rango de Afectación</b>
<b>Altura del talud</b>	≥10 m	7
	<10 m	3
<b>Inclinación del talud</b>	≥45°	1
	<45°	0
<b>Salientes topográficas</b>	Presentes	3
	Ausentes	0
<b>Espesor de suelo superficial</b>	≥0.5 m	1
	<0.5 m	0
<b>Nacimiento de agua</b>	Presentes	1
	Ausentes	0
<b>Fallas alrededor del área</b>	Presentes	3
	Ausentes	0

En la Tabla 2.2 se observan los valores que se asignaron a los diferentes factores empleados, así como el peso de esa capa en el SIG, para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en la provincia de Kilis, Turquía, por Gülersoy & Çelík (2017), utilizando 7 factores considerables para determinar la suscepibilidad a los deslizamientos, le dio un valor a las diferentes clases de los factores y un peso a la capa generada al momento de sumarse.

Tabla 2.2. Valores para los diferentes factores empleados en el SIG, en la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos (tomado de Gülersoy & Çelík, 2017).

Base	Class Value	GIS weight value	Base	Class Value	GIS weight value
Lithology	1	8	Morphography	1	8
	3			3	
	5			5	
Slope	1	7	Vegetation	1	4
	2			5	
	3		Aspect	1	3
	4			3	
Curvature	1	6	DEM	5	2
	2			1	
	3			2	
	4			3	
	5			4	
	6			5	
				6	

En la Tabla 2.3 se presenta el grado de susceptibilidad utilizado por diversos autores (Kanungo, 1993. Suárez Díaz, 1998; Suárez García, 2006). En ella se puede apreciar que maneja cinco grados de susceptibilidad según los resultados obtenidos en el modelo o las condiciones del medio; estos grados son: muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo, como grados de susceptibilidad a los deslizamientos. También se describe el criterio considerado para cada grado.

Tabla 2.3. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos (Kanungo, 1993. Tomada de Suárez Díaz, 1998; Suárez García, 2006).

Grado de Susceptibilidad	Criterio
<b>Muy alto</b>	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurra
<b>Alto</b>	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
<b>Moderado</b>	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos, pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
<b>Bajo</b>	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados, no saturados, con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.
<b>Muy Bajo</b>	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

En la Tabla 2.4 se expone la clasificación de las rocas a partir de su resistencia a la compresión simple, tomada de González de Vallejo et al. (2002). En ella se observan los distintos tipos de roca y la clase asignada por distintos criterios de autores o asociaciones.

*Tabla 2.4. Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple (tomada de González de Vallejo et al. 2002).*

Resistencia a la Compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Blenlawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1 – 5	Muy blanda	Blanda > 1.25	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5 – 12.5	Blanda	Moderadamente blanda		
12.5 – 25		Moderadamente dura		
25 – 50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50 – 100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100 – 200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
> 200		Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.
> 250	Extremadamente dura			

CENAPRED elaboró una guía para la creación de mapas de susceptibilidad, peligro y riesgo, en los cuales da valores a las clases de los diferentes factores que pueden influir en la amenaza. En la Tabla 2.5 se observa la clasificación para los factores Topográficos; la Tabla 2.6 muestra los valores asignados a los factores geotécnicos y la Tabla 2.7 presenta los factores geomorfológicos y ambientales, así como su clasificación y el valor asignado.

*Tabla 2.5. Clasificación de los Factores Topográficos (tomado de CENAPRED, 2004).*

Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación
Inclinación de los taludes	Más de 45°	2.0	Estima el valor medio. Úsese clinómetro.	
	35° a 45°	1.8		
	25° a 35°	1.4		
	15° a 25°	1.0		
	Menos de 15°	0.5		

Continuación de la Tabla 2.5

<b>Altura</b>	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsele nivelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS.	
	50 a 100 m	1.2		
	100 a 200 m	1.6		
	Más de 200 m	2.0		
<b>Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región</b>	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños	
	Algunos someros	0.4		
	Si, incluso con fechas	0.6		

Tabla 2.6. Clasificación de los Factores Geotécnicos (tomado de CENAPRED, 2004).

<b>Factor</b>	<b>Intervalos o categorías</b>		<b>Atributo relativo</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Calificación</b>
<b>Tipo de suelos o rocas</b>	Suelos granulares mediante compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión; o suelos de consistencia blanda.	
<b>Tipo de suelos o rocas</b>	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0		
	Suelos arcillosos consistentes o areno limoso compactos.		0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado.	
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.) y tobas competentes.		0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5 según el grado de meteorización	
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, etc.).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.	
	Espesor de la capa de suelo	Menos de 5 m	0.5	Revísense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.	
		5 a 10 m	1.0		
		10 a 15 m	1.4		
		15 a 20 m	1.8		
<b>Aspectos estructurales en formaciones rocosas</b>	Echado de la discontinuidad	Menos de 15°	0.3	Considere planos de contacto entre formación grietas, juntas y planos de debilidad	
		25° a 35°	0.6		
		Más de 45°	0.9		
	Ánulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud.	Más de 10°	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado es mayor que la inclinación del talud.	
		0° a 10°	0.5		
		0°	0.7		
		0° a -10°	0.8		
		Más de -10°	1.0		

Continuación de la Tabla 2.6					
	Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de dirección del talud.	Más de 30°	0.2	Considerar la dirección de las discontinuidades más representativas.	
		10° a 20°	0.3		
		Menos de 5°	0.5		

*Tabla 2.7. Clasificación de los Factores Geomorfológicos y Ambientales (tomado de CENAPRED, 2004).*

<b>Factor</b>	<b>Intervalos o categorías</b>	<b>Atributo relativo</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Calificación</b>
<b>Evidencias geomorfológicas de “huecos” en laderas contiguas</b>	Inexistentes	0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).	
	Volúmenes moderados	0.5		
	Grandes volúmenes faltantes	1.0		
<b>Vegetación y uso de la tierra</b>	Zona urbana	2.0	Considere no solo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	
	Cultivos anuales	1.5		
	Vegetación intensa	0.0		
	Vegetación moderada	0.8		
	Área deforestada	2.0		
<b>Régimen del agua en la ladera</b>	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud	
	Nivel freático inexistente	0.0		
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0		

## 2.3 Sistemas de Información geográfica (SIG)

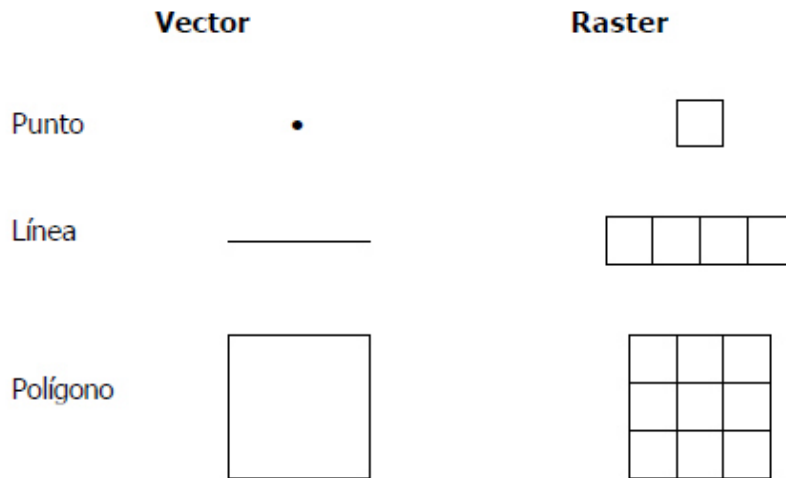
Los avances en información, tecnología e ingeniería de software han sido de gran ayuda para la elaboración y evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es un sistema utilizado para describir y categorizar la Tierra y otras “geografías”, haciendo una integración organizada de hardware, software y datos geográficos, que sirven para procesar, visualizar, capturar, almacenar, manipular, analizar y modelar entre otros, la información o los datos espaciales (INEGI, 2010b; Burrough & McDonnell, 1998). A través de los SIG se pueden visualizar datos geométricos y no geométricos, de atributos o procesos que interactúan en la

superficie terrestre en la forma de mapas mediante computadoras, software y herramientas que poseen para el análisis y modelado de datos georreferenciados (Quispe Medina, 2005; Jiménez-Perálvarez, 2012).

El funcionamiento de un SIG se basa en datos con información geográfica vinculados por un identificador común dentro de un mapa digital a un objeto gráfico, que posee atributos, que se pueden conocer. Esta visualización depende del SIG, ya que éste puede ser de tipo vector o ráster; siendo los de tipo vector útiles si todos los datos son importantes para el análisis; éste varía según su dimensión y escala de trabajo, así como la información que poseen, se pueden representar a través del punto, la línea o el polígono, que podrán estar definidos en dos o tres dimensiones y en un sistema de coordenadas (Murillo Sánchez, 2002; INEGI, 2010b).

El punto es la representación geométrica más simple de la información geográfica o de sus objetos; se define por un par de coordenadas (X, Y), se puede usar según la escala de trabajo para representar objetos o datos. La línea es una representación geométrica de una serie de dos o más pares distintos de coordenadas, que se encuentran unidos o ligados secuencialmente en el mismo plano de referencia (X, Y). El polígono es una representación geométrica delimitada por una línea cerrada o serie de líneas que cierran, donde el inicio y el fin de las líneas o el polígono tienen el mismo valor de coordenada (X, Y). En la Figura 2.1 se observa la comparación entre los datos de tipo vector y de tipo raster (INEGI, 2010b).

El SIG de tipo ráster está formado por píxeles, que son capas con información y valor, este valor forma el píxel y se visualiza con un color; los resultados con mayor detalle o precisión los da un píxel de tamaño pequeño a comparación con un píxel de tamaño grande, que puede tener algo de inexactitud o irregularidades, sin embargo, los píxeles pequeños producen una vasta cantidad de datos SIG. (Quispe Medina, 2005; ESRI, 2017; Jiménez-Perálvarez, 2012).



*Figura 2.1. Formatos utilizados en Sistemas de Información Geográfica (Maidment and Engel, 2002; tomado de Murillo Sánchez, 2002).*

En el modelo de inestabilidad de ladera resulta muy útil el uso de los SIG, realizando zonificaciones para determinadas áreas como susceptibles, de peligro o riesgo, basado en la digitalización, almacenamiento y manipulación de la información vinculada a los diferentes factores que influyen en el análisis, la sobreposición de mapas temáticos sirve para conocer de mejor manera áreas específicas de sobre algún dato, identificando patrones, o con los valores obtenidos (Gobierno del estado de Tamaulipas, 2011) (CENAPRED, 2004).



### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Descripción de la zona de estudio**

México está localizado en América del Norte, y tiene una superficie de 1,964,375 km<sup>2</sup>. En la parte Noreste del país se ubica el estado de Nuevo León, que cuenta con una superficie de 64,555 km<sup>2</sup> y se divide en 51 municipios, (INEGI, 2014). Limita al norte con el estado de Coahuila, los Estados Unidos de América y el estado de Tamaulipas; hacia el este limita con el estado de Tamaulipas; al sur con el estado de San Luis Potosí y hacia el oeste limita con los estados de Coahuila, San Luis Potosí y Zacatecas (INAFED, 2017).

La capital del estado es Monterrey que, debido a su gran crecimiento poblacional, industrial, económico, etc., se conforma como Área Metropolitana de Monterrey (AMM), uniendo a varios municipios cercanos a Monterrey. El AMM es un ejemplo importante para México, pues es la tercera metrópoli por tamaño con un área total cubierta de 4,107.54 km<sup>2</sup> (INEGI, 2010). En la Figura 3.1 se puede observar el área de estudio, que comprende parte de los municipios de Apodaca, General Escobedo, Juárez, García, Guadalupe, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina, Cadereyta Jiménez, Santiago y Salinas Victoria.

El AMM se caracteriza por estar ubicada en la Provincia Sierra Madre Oriental, y se conforma por sierras alineadas con orientación NW-SE, con elevaciones máximas de 2500 msnm (CENAPRED, 2010). Dentro del área de estudio se encuentran el cerro de Las Mitras, el cerro del Topo Chico, el cerro de La Silla, el cerro de la Loma Larga, el cañón del Huajuco, cerro del Mirador, cerro de La Corona, y el frente norte de la Sierra Madre Oriental o anticlinal de los Muertos (Ayuntamiento de Monterrey, 2014). La Figura 3.2 muestra la ubicación de estas montañas.

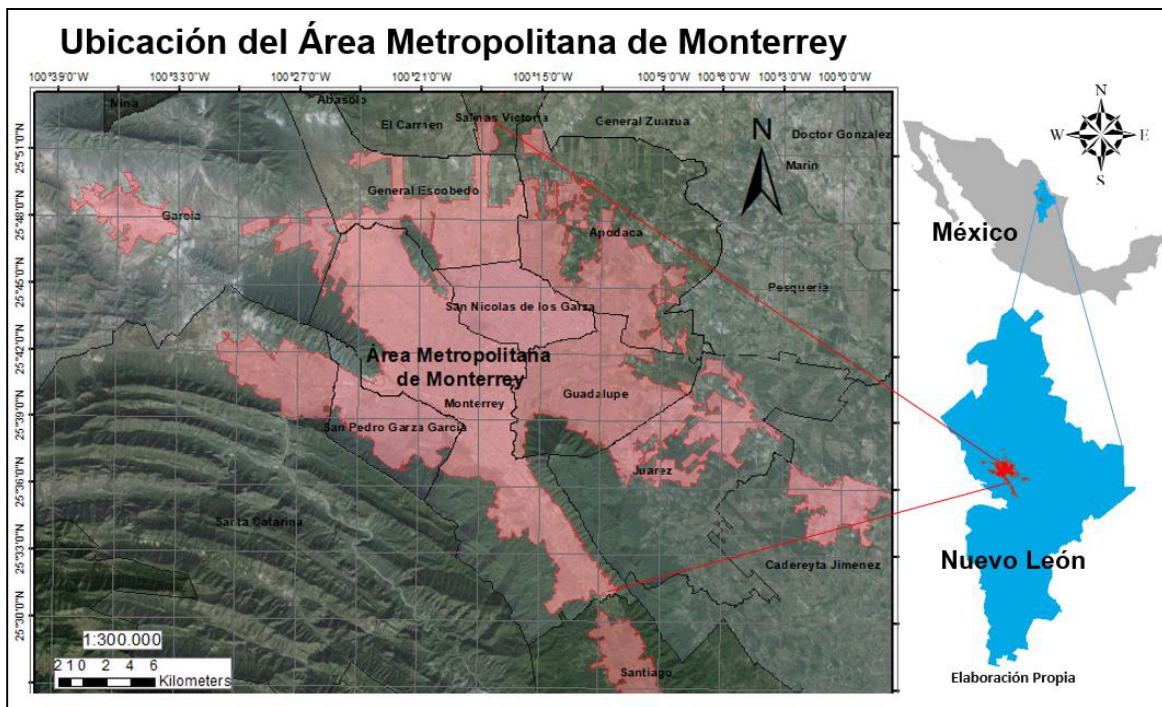


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio.

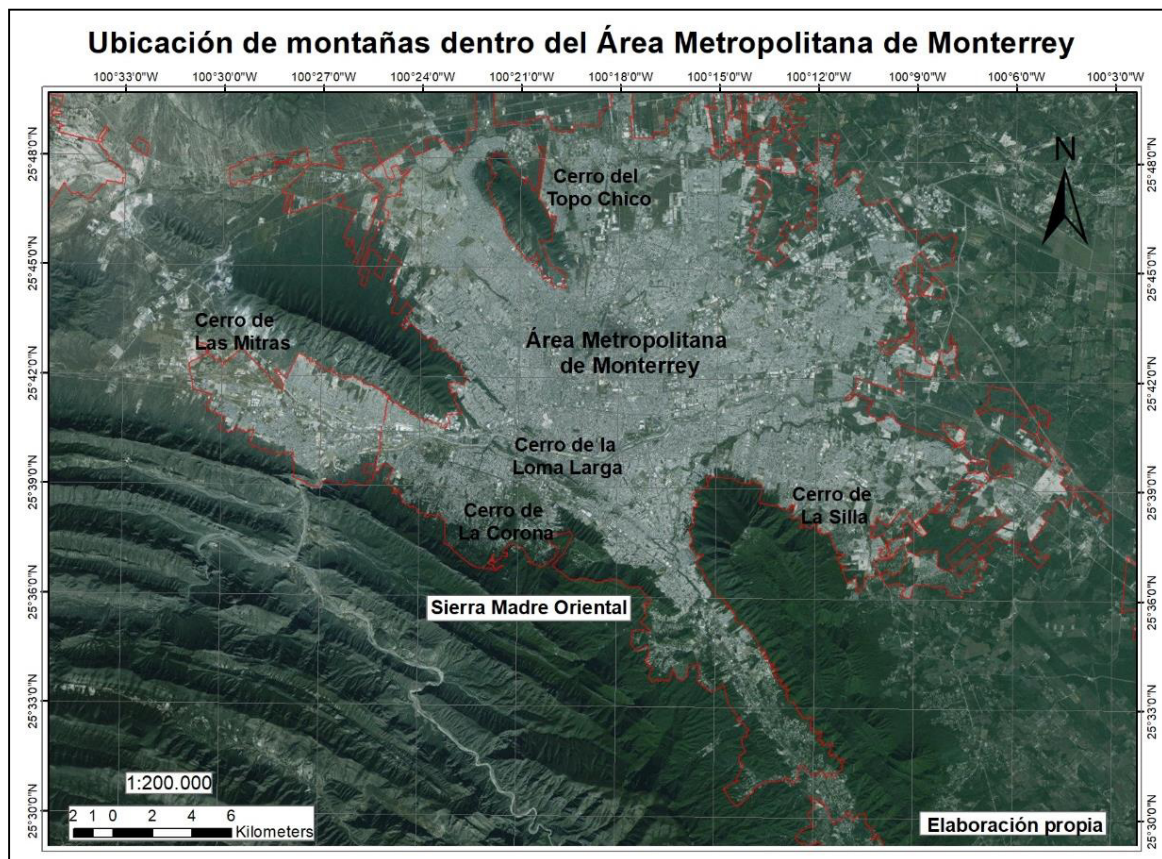


Figura 3.2. Ubicación de las montañas en el AMM.



## 3.2 Características de la zona

### 3.2.1 Fisiografía

La superficie del Estado forma parte de las provincias: Sierra Madre Oriental, Grandes Llanuras de Norteamérica y Llanura Costera del Golfo Norte. En la Figura 3.3 se observa la carta de fisiografía del país; el AMM presenta una unión de 2 de las 3 regiones fisiográficas antes mencionadas, que incluyen sierras, lomas suaves con bajadas y con llanuras. Gran parte del AMM se caracteriza por estar ubicada en la Sierra Madre Oriental y en la Llanura Costera del Golfo Norte; se conforma por sierras alineadas de orientación NW-SE; así mismo, en el valle de Monterrey, se localizan algunas lomas separadas de los cerros de las sierras y algunos cañones, (INAFED, 2017).

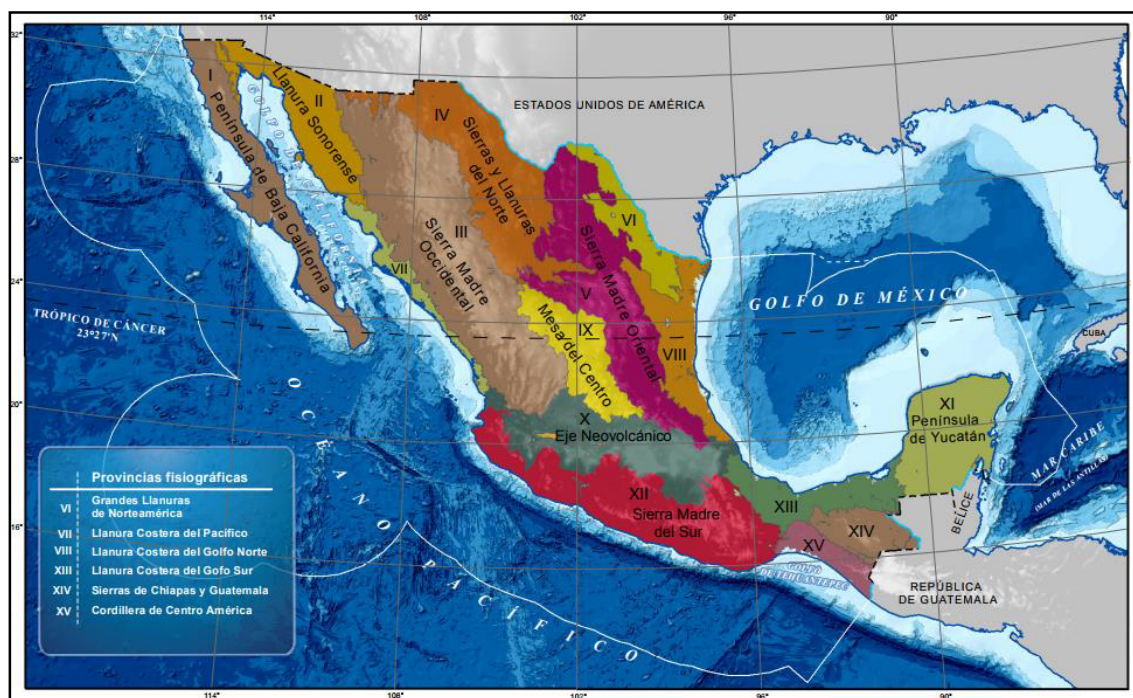


Figura 3.3. Regiones Fisiográficas del país (tomado de INEGI, 2014. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica, Escala 1:1000000).

Dentro del área de estudio se encuentra el cerro de Las Mitras, el cerro del Topo Chico, el cerro de La Silla, el cerro de la Loma Larga, el cañón del Huajuco, el cerro del Mirador, el cerro de La Corona y el frente norte de la Sierra Madre Oriental o anticlinal de los Muertos, lugares donde se han formado asentamientos en zonas

de riesgo, como laderas o faldas de los cerros, debido a la concentración de la población por el crecimiento urbano, con algunos asentamientos regulados y otros de tipo irregular; sin embargo, algunas de estas zonas siguen poblándose (Ayuntamiento de Monterrey, 2014).

### **3.2.2 Geología**

La constitución geológica que abunda en el AMM son las formaciones sedimentarias de origen marino. Las características litológicas de este tipo de formaciones geológicas (Méndez, San Felipe, Agua Nueva, Cuesta del Cura, Aurora, La Peña, Cupido, Taraises, La Casita, Zuloaga y Minas Viejas) son semejantes en comportamiento y se agrupan en tres grupos de rocas: calizas, lutitas y conglomerados y areniscas (Michalzik, 1988). Como es el caso de la Sierra Madre Oriental, la cual contiene grandes cantidades de rocas carbonatadas, arcillosas, limosas y arenosas (INAFED, 2017).

La Sierra Madre Oriental presenta grandes estructuras plegadas con rocas del Mesozoico; su complejo basal fue levantado, comprimido y transportado hacia el noreste formando pliegues y cabalgaduras, por el evento deformacional laramídico (Orogenia Laramide) durante el Terciario. Está constituido por pliegues anticlinales y sinclinales, afectados por grandes fallas de tipo normal y numerosas fallas inversas (INEGI, 1986; Eguiluz de Antuñano, Aranda García, & Marrett, 2000; Murillo Sánchez, 2002; Torres Sánchez, et al. 2015).

La Sierra Madre Oriental presenta esquistos del Precámbrico, afloramientos de areniscas y asociaciones de areniscas y lutitas intercaladas pertenecientes al Triásico; hay grandes afloramientos de calizas, yeso y de yeso asociado con caliza del Jurásico Superior; también afloran lutitas y diversas asociaciones de calizas con lutitas y de lutitas con areniscas del Jurásico y el Cretácico; existen depósitos de conglomerados y rellenos aluviales del cuaternario (INEGI, 1986; Murillo Sánchez, 2002; Ayuntamiento de Monterrey, 2014; INEGI, 2014). En la Figura 3.4 se muestra la carta Geológico-Minera, de Monterrey G-14-7, en la que se observa el tipo de roca en la zona.

La parte norte de Monterrey está representada por rocas calcáreas del Cretácico Inferior; hay afloramientos rocosos del Cretácico Superior, constituido por lutitas, conglomerados del Terciario y rellenos aluviales del Cuaternario. Existen numerosos pliegues de reducidas dimensiones en las estructuras de las rocas del Cretácico y de cuantiosas fracturas y fallas de corriente horizontal. Por las características de la zona, no existen yacimientos de minerales metálicos y sólo se explotan los bancos de caliza (INEGI, 1986; Ayuntamiento de Monterrey, 2014).

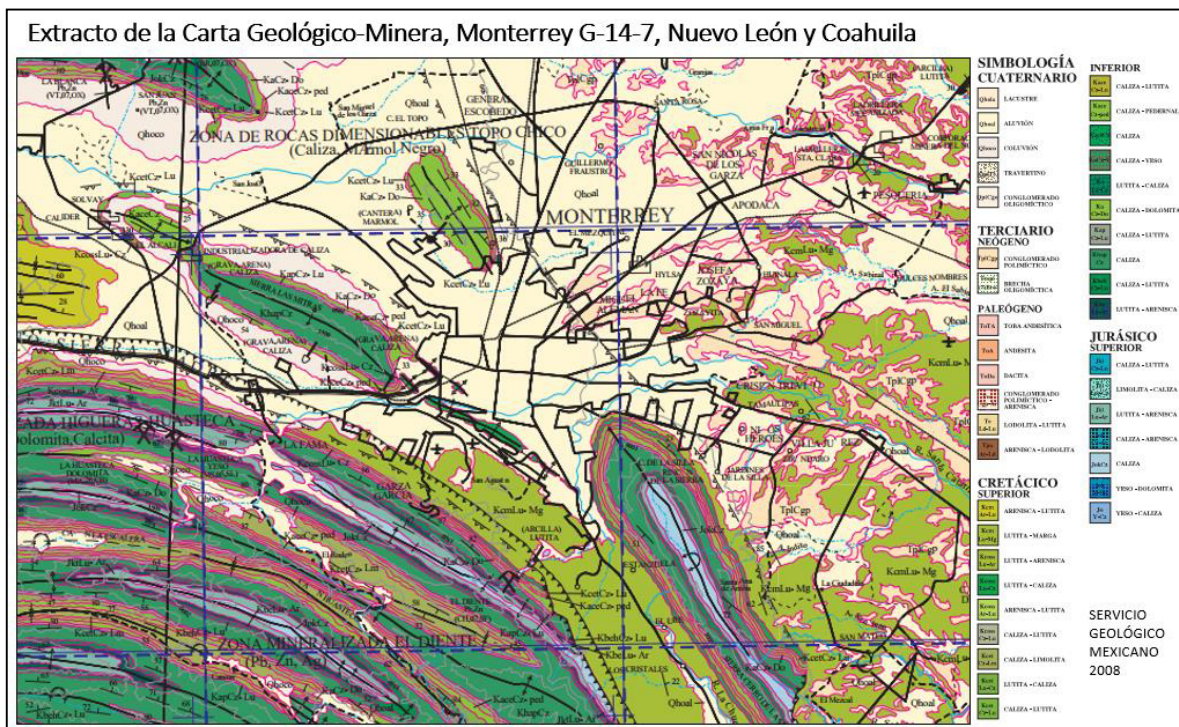


Figura 3.4. Litología del AMM (tomado del Servicio Geológico Mexicano “Carta Geológico-Minera, Monterrey G-14-7, Nuevo León y Coahuila”, edición 2008).

Entre las rocas que presentan mayor susceptibilidad a los deslizamientos se encuentran las calizas, lutitas, limolitas y areniscas, agregando factores de estratificación, plegamiento, fallamiento y sumando detonantes como la precipitación, los sismos y la pendiente del terreno, entre otros factores que pueden acelerar estos procesos (CENAPRED, 2010; Instituto Municipal de Planeación Urbana y Convivencia de Monterrey, 2014).



### 3.2.3 Edafología

El AMM presenta suelos semiáridos propios de la región; en su mayoría, los suelos tienden a ser delgados y de textura gruesa. Los suelos que abundan son los vertisoles, estos son profundos y de color oscuro; que también se encuentra en diversas asociaciones. Alrededor de la sierra de las Mitras y en gran parte del AMM aparecen los suelos leptosol (también conocido como litosol) y rendzina y asociaciones de ellos, éstos son suelos someros limitados por caliche.

En la zona de la sierra Madre Oriental predomina el litosol y asociado con xerosoles cálcicos y háplicos; en las partes llanas se encuentran los vertisoles pélicos de color negro, o gris oscuro, que son arcillosos, un poco alcalinos, salinos y sódicos y en ocasiones con altos contenidos de carbonato de calcio. En lomeríos o llanos con pendientes se puede apreciar el vertisol crómico, de color pardo o rojizo, arcilloso (INEGI, 1986; Ayuntamiento de Monterrey, 2014; INAFED, 2017). En la Figura 3.5 se observan los diferentes tipos de suelos que abundan en el AMM.

#### Suelos dominantes en el AMM

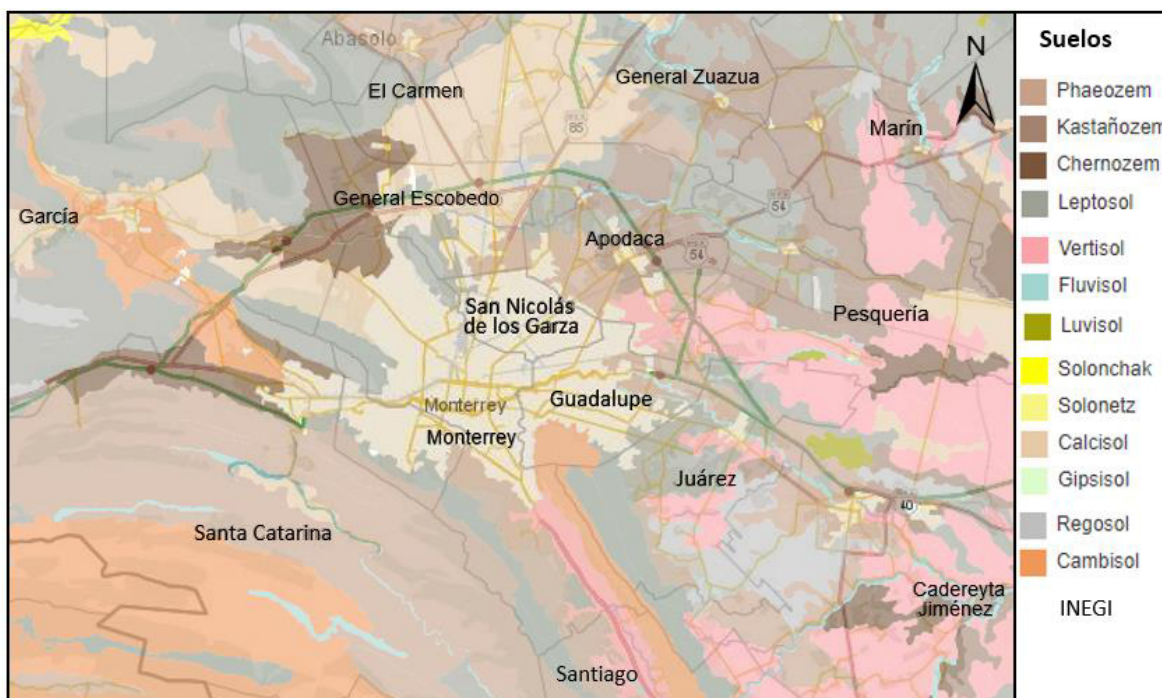


Figura 3.5. Edafología del AMM (tomado de Mapa Digital de México, INEGI).

### 3.2.4 Hidrología

CONAGUA definió 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), conformadas por 37 regiones hidrológicas; que, a su vez, se encuentran integradas por 731 cuencas hidrológicas en el país. El estado de Nuevo León queda dentro de la RHA de Río Bravo; abarca parte de algunas regiones hidrológicas, como Río Bravo, San Fernando-Soto La Marina y El Salado (CONAGUA, 2015; INAFED, 2017). El AMM queda dentro de la cuenca río Bravo-San Juan, es una de las cinco cuencas en que se divide la región hidrológica río Bravo como lo muestra la Figura 3.6.

#### Regiones y Cuencas Hidrológicas

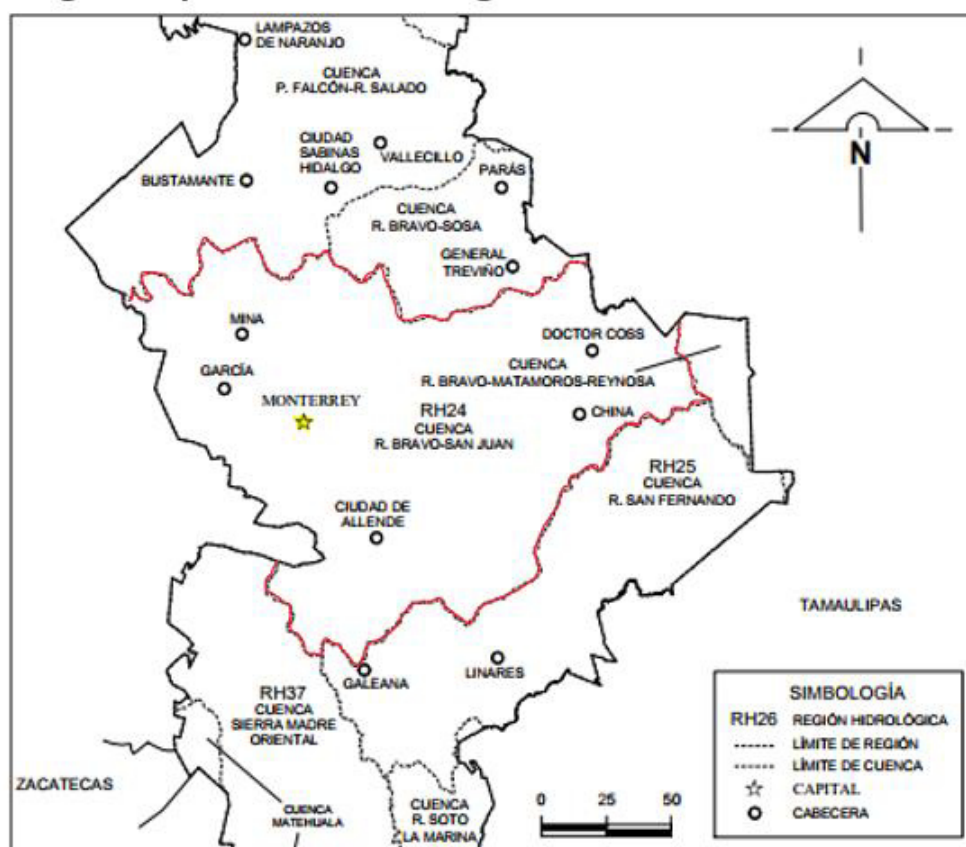


Figura 3.6. Cuenca Hidrológica en el AMM (tomado del Anuario Estadístico de Nuevo León. INEGI, 2005).

Los ríos Santa Catarina, Pesquería y Ramos, entre otros, sirven de aporte al río San Juan, que es el segundo afluente de importancia del río Bravo. En la Figura 3.7 se observan algunos de estos ríos. El río San Juan nace en el arroyo La Chueca y recibe aportaciones de pequeños arroyos perennes que bajan de la Sierra Madre





atraviesa las avenidas Lázaro Cárdenas y Eugenio Garza Sada, al norte del cerro de La Campana, es un afluente del río La Silla, su cauce ha sido modificado debido a la urbanización de la zona (Ayuntamiento de Monterrey, 2014).

Los cuerpos de agua que se encuentran en el AMM tienen poca importancia en cuanto a los caudales; sin embargo, este hecho cambia cuando hay altas precipitaciones, pues los caudales aumentan considerablemente, perjudicando los asentamientos urbanos. El AMM también se ve afectada por los escurrimientos intermitentes, como resultado de las lluvias, debido a las montañas circundantes (Ayuntamiento de Monterrey, 2014).

El abastecimiento de agua potable para el AMM es un gran problema por resolver, ya que en esta área son escasos los recursos hídricos, el clima es extremoso, hay un gran crecimiento de la población, etc. Sin embargo, se lleva la explotación de agua subterránea en los campos de Mina, Monterrey, Buenos Aires, Topo Chico y La Huasteca, para abastecer a la población; así mismo algunas presas, aportan agua al AMM: presa El Cuchillo, presa Cerro Prieto, presa La Salinillas, presa Rodrigo Gómez (La Boca) y presa de Agualeguas (INAFED, 2017).

### **3.2.5 Clima**

El estado de Nuevo León presenta un clima muy variado, de acuerdo con las grandes regiones que forman la Sierra Madre; sin embargo, el que predomina es el seco, en un 68%, de ahí parte a semiseco, templado subhúmedo y muy seco. Su temperatura media anual es de 8° a 24°C; la temperatura máxima promedio es de 32°C, la temperatura mínima promedio es de 5°C; la precipitación es baja, sin embargo, se presentan registros de lluvias intensas en el mes de septiembre, lo que provoca que la precipitación promedio varíe de 200 a 1,200 mm. En las zonas de transición de llanura a sierra se registran las máximas precipitaciones. Las diferencias de temperatura surgen por la existencia de cadenas montañosas, que producen un efecto de condensación, generando lluvias en algunas zonas (INEGI, 1986; INEGI, 2016; INAFED, 2017). En la Figura 3.8 se observan los tipos de clima que existen en el AMM y en gran parte del estado de Nuevo León.

El AMM presenta un clima seco estepario, semiárido húmedo, cálido y extremoso, con lluvias irregulares al fin del verano, aunque la situación en la que se encuentra y algunos factores antes señalados favorecen la presencia de diversos climas, como: secos extremosos, semisecos, templados y semicálidos. La temperatura máxima extrema es de 45°C y la mínima extrema de -2°C. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto y el mes más frío es enero (Ayuntamiento de Monterrey, 2014). La dirección de los vientos es suroriente-norponiente; pero durante el invierno esta dirección cambia debido a las masas de aire frío provenientes del norte y del noreste.

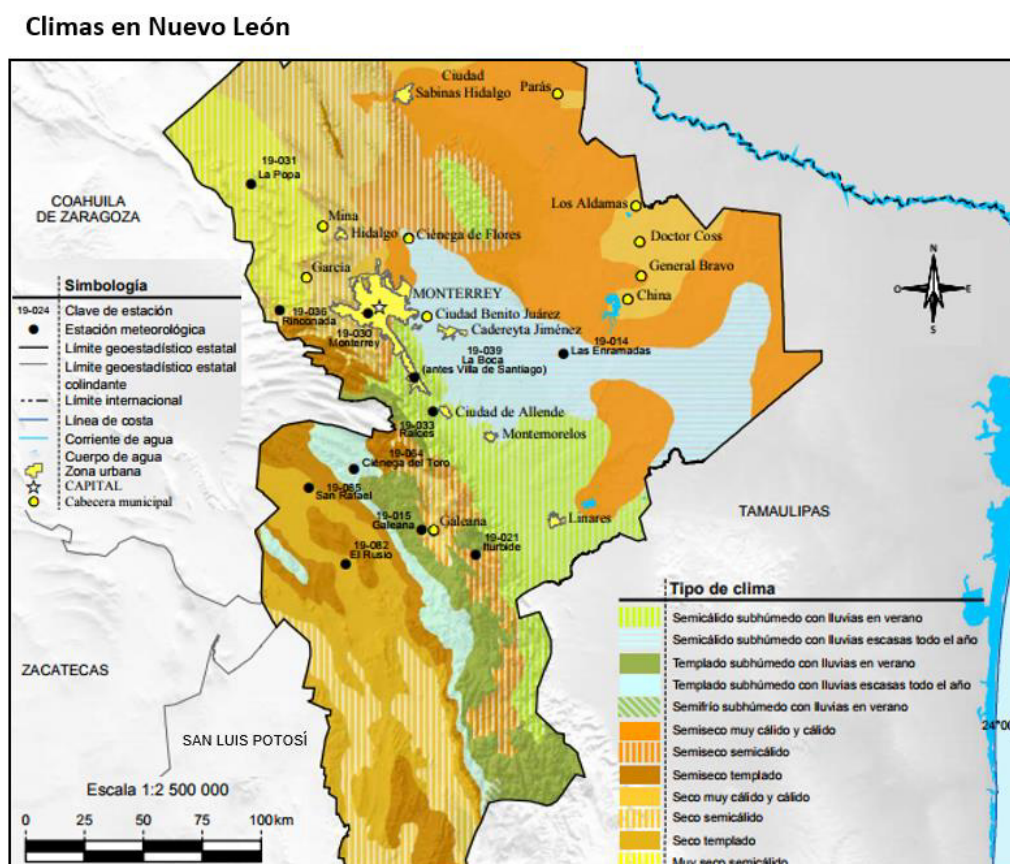
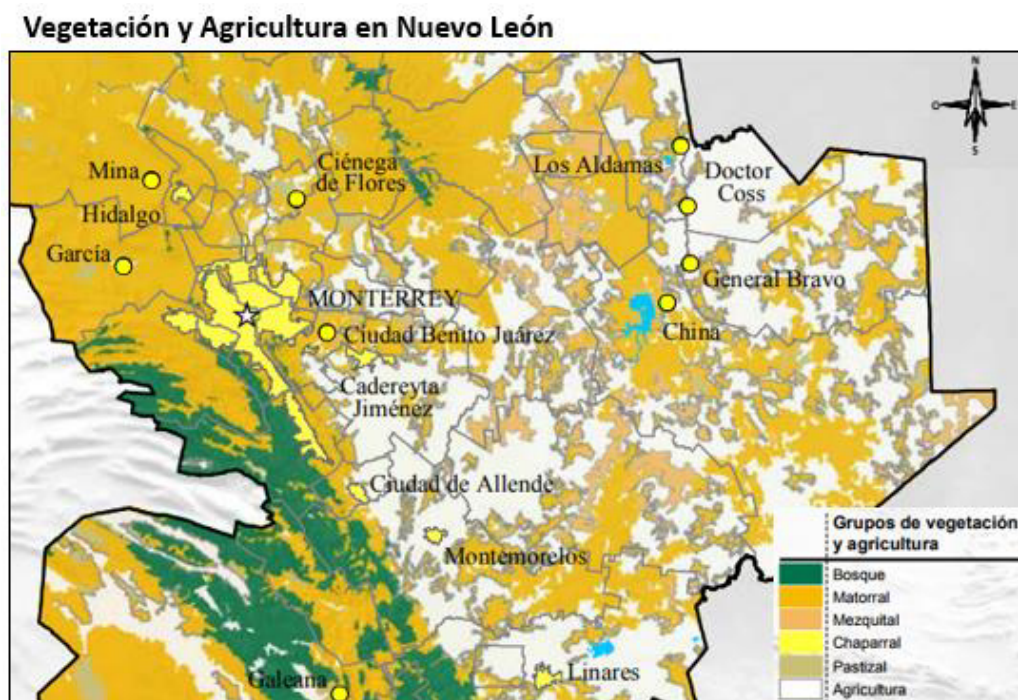


Figura 3.8. Climas en parte del estado de Nuevo León, (Tomado de “Continuo Nacional del Conjunto de Datos de Geográficos de la Carta de Climas” INEGI, 2015).

### 3.2.6 Vegetación

Nuevo León se localiza en una región predominantemente semiárida; presenta condiciones geográficas que le permiten una vegetación diversa, debido a las 3

regiones fisiográficas que lo componen; los matorrales ocupan más de la mitad de la superficie del estado, mientras que los bosques de coníferas y encinos se encuentran en las zonas altas, como lo muestra la Figura 3.9. La agricultura ocupa un 28% de la superficie del Estado (INEGI, 2016).



*Figura 3.9. Parte del mapa de Vegetación en el estado de Nuevo León, (Tomado de "Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación" INEGI, 2015).*

La zona de la Sierra Madre Oriental presenta matorral desértico micrófilo y el matorral desértico rosetófilo; en otras áreas sobresalen los bosques de pino, los pastizales naturales e inducidos, la vegetación halófila y de páramo de altura. El AMM presenta un 80% de vegetación no nativa en parques, áreas verdes y domicilios; cuenta con áreas naturales protegidas, como el cerro de La Silla y Cumbres de Monterrey, con vegetación nativa original, y algunas zonas montañosas, que son de conservación y preservación de los recursos naturales. Existe desertificación debido a la pérdida de vegetación y a la erosión por arrastre de materiales (Ayuntamiento de Monterrey, 2014; INAFED, 2017).

### 3.2.7 Sismicidad

La sismicidad es un fenómeno producido por el movimiento interno de la Tierra, ha estado a lo largo de la historia geológica y continuará presentándose de manera similar. Los sismos no se pueden predecir, sin embargo, se presentan en regiones y magnitudes definidas según los datos históricos y estudios geofísicos (CENAPRED, 2004; 2006). México se ubica en una región de alta actividad sísmica y volcánica provocada por el movimiento de 5 placas tectónicas. Los sismos de gran magnitud (mayor o igual a 7), suelen ocasionar grandes daños y su epicentro se localiza en las costas de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas; también en Veracruz, Puebla, Estado de México, Sonora y Baja California (CENAPRED, 2004).

El territorio nacional está clasificado en 4 regiones según su nivel de peligro sísmico en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, la Figura 3.10 muestra la clasificación, conocida como Regionalización Sísmica (CFE, 1993). El AMM se encuentra en la zona A, donde registros históricos indican que no se han reportado sismos de gran intensidad en los últimos 80 años, por lo que se considera zona de baja sismicidad y de menor peligro (CENAPRED, 2004).

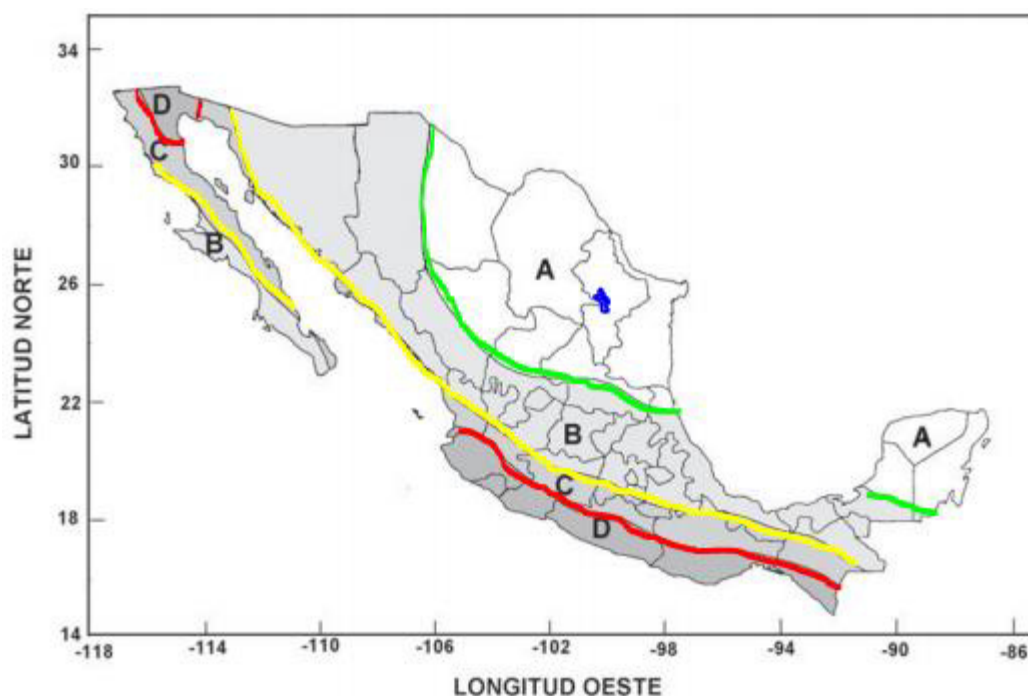


Figura 3.10. Regionalización Sísmica de México.

La intensidad o magnitud de un sismo suele medirse de acuerdo a la escala de Mercalli y de acuerdo a la amplitud de onda registrada en escala Richter, siendo esta última la más común. Un sismo de magnitud 4 suele ocurrir varias veces por semana en las costas del pacífico mexicano, sin embargo, no es la mitad de un sismo de magnitud 8, el cual no ocurre tan seguido; un sismo de magnitud 8 equivale a 1 millón de sismos de magnitud 4 (CENAPRED, 2004).

El estado de Nuevo León ha presentado algunos sismos de baja intensidad, asociados a eventos antropogénicos provocados por una sobreexplotación de los acuíferos en rocas calcáreas (IMPLAN, 2012). El registro de los sismos en el noreste del país ronda en los 4 grados de magnitud en escala Richter (Gobierno del estado de Tamaulipas, 2011) “que prácticamente son imperceptibles y documentalmente son sismos de magnitud pequeña declaró el Dr. Montalvo Arrieta” (Montalvo, 2014).

Por tal motivo en el presente estudio no se considera la parte de sismicidad en el “Modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre la inestabilidad de laderas en el área metropolitana de Monterrey, N.L. México”.

### **3.3 Datos utilizados**

Para generar el modelo se recabó información meteorológica, topográfica y geológica. Los datos se obtuvieron de algunas dependencias, como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el INEGI, que se pueden descargar de forma gratuita, accediendo a sus plataformas digitales. Algunos datos utilizados son el modelo digital de elevación, para obtener la topografía de la zona; el tipo de roca y de suelo, los echados, las fallas y las fracturas, que dan información geológica; la red hidrológica, para conocer los cauces y el tipo de orden de los diferentes escurrimientos; la cobertura vegetal, para conocer las zonas con vegetación o deforestadas entre otras y los datos de precipitaciones, como factor detonante. Los datos utilizados para generar el modelo de inestabilidad de laderas se describen a continuación:

- Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en ingles), obtenido a partir de puntos LIDAR para el Área Metropolitana de Monterrey por INEGI, cuenta con las siguientes características: sistema coordinado horizontal UTM, zona 14, unidad horizontal y vertical en metros, resolución horizontal de 5, precisión vertical de 1 m, fecha de datos fuente 2007, producido por INEGI.
- Capa de litología, conjunto de datos vectoriales en formato “shape”, con proyección geográfica Cónica Conforme de Lambert (CCL), obtenido de la unión de INEGI y SGM, en el cual se digitalizaron partes para complementarlo, presenta atributos como el tipo de roca de acuerdo con su origen y composición mineralógica, su símbolo y la era a la que pertenece, entre otros. Fecha de datos fuente 2007, escala 1: 250,000.
- Capa de edafología conjunto de datos vectoriales en formato “shape”, con proyección geográfica Cónica Conforme de Lambert (CCL), obtenido de INEGI de acuerdo con su origen, la fecha de datos fuente 2007, la escala 1: 50,000.
- Capa de echados, creación de capa de conjunto de datos vectoriales en formato “shape”, como puntos digitalizados a partir de las cartas geológicas del INEGI y SGM, con proyección geográfica NAD 1927 UTM Zone 14N.
- Capa de fallas y fracturas, conjunto de datos vectoriales en formato shape, con proyección geográfica NAD 1927 Albers, obtenido de la digitalización de datos de INEGI, en unión con datos del SGM, de acuerdo con su estructura, y la fecha de datos fuente 2007.
- Capa de red hidrográfica en escala 1:50,000: es un conjunto de datos vectoriales en formato “shape”, en coordenadas geográficas con Datum ITRF92 época 1988.0 construido a partir de rasgos hidrográficos superficiales y de datos vectoriales topográficos, obtenido de INEGI.
- Capa de cobertura vegetal: conjunto de datos vectoriales en formato “shape”, escala 1: 250,000, con proyección geográfica Cónica Conforme de Lambert (CCL), obtenido de INEGI, muestra la distribución de la vegetación, áreas de uso agrícola, pecuario y forestal.

- Información de Precipitación. Se descargaron datos de estaciones climatológicas, de la red del Servicio Meteorológico Nacional, a cargo de CONAGUA. Los datos son lecturas cada 24 horas concluyendo, a las 8 am.

Se obtuvieron las capas vectoriales de las que se extrajeron atributos para los factores geológicos y ambientales. Atributos como el ángulo de echados, el tipo de roca o vegetación fueron categorizados otorgándoles un valor ponderado, con herramienta de un software para SIG, que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica (Dragicevic, Lai, & Balram, 2014; Esri, 2017).

Para este estudio fue necesario la sobreposición de mapas temáticos de los factores involucrados en los movimientos de laderas (método ponderado), realizando una suma de sus valores y combinando las capas vectoriales. Se obtuvo como resultado un mapa con todas las áreas combinadas (Suárez García, 2006), en la Figura 3.11 se muestran los factores, los insumos y las capas vectoriales generadas, a través de un diagrama del proceso para la obtención del modelo.

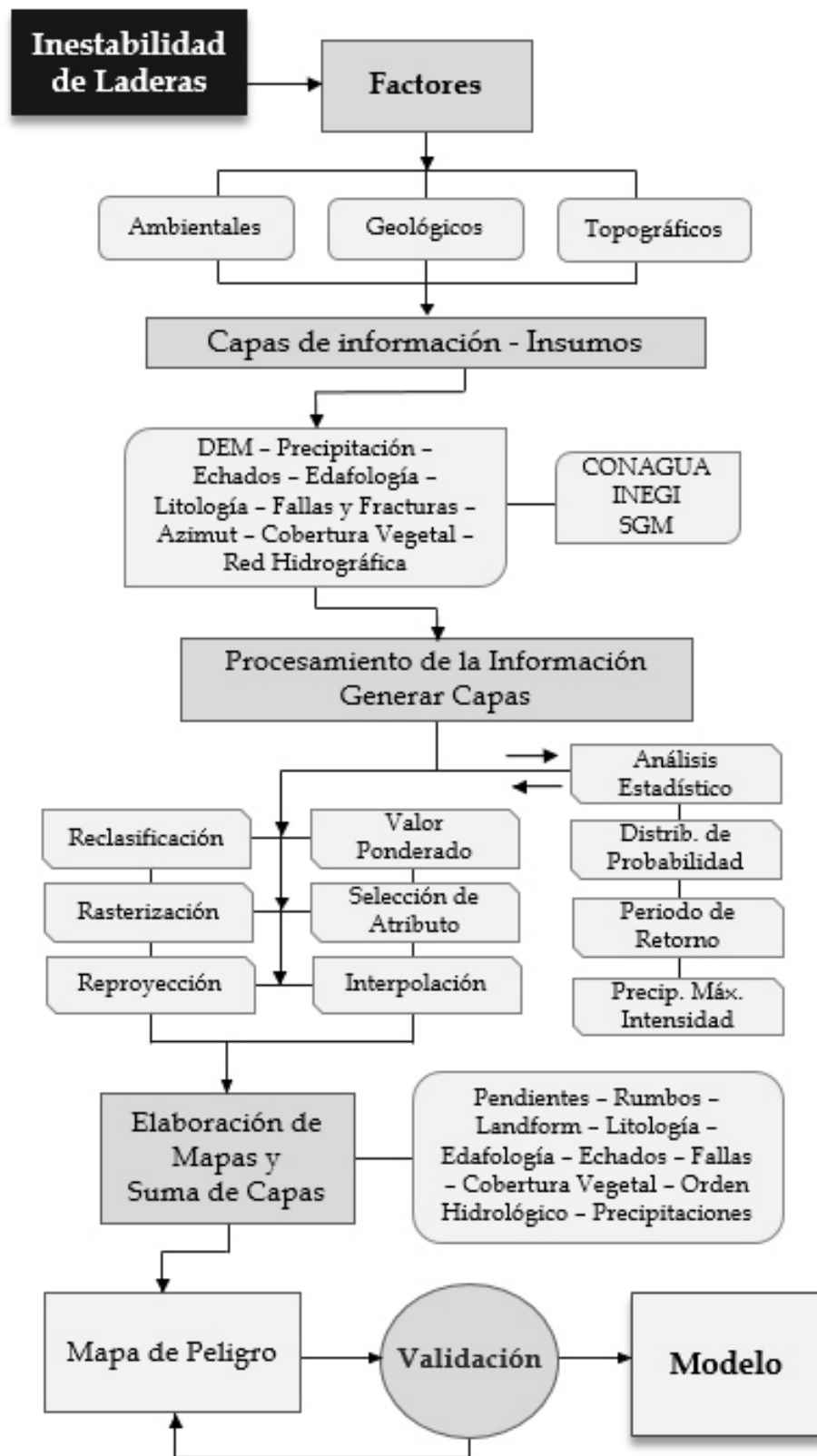


Figura 3.11. Diagrama de proceso del modelo.



### **3.4 Procesamiento de la información**

De cada capa obtenida (pendientes, rumbos, litología, uso de suelo, escurrimientos, fallas, echados), se extrajo el atributo para el modelo, se le otorgó un valor relativo y se rasterizó, a un tamaño de celda de 5x5 m. Cada ráster fue proyectado al mismo sistema de coordenadas (WGS 1984, UTM, Zona 14), para cumplir los requerimientos de procesamiento espacial. Se realizó una reclasificación de las capas, otorgándoles un valor del 1 al 5 (considerando 5 para los valores que presenten mayor probabilidad de deslizamiento), se evaluó la información, y se le asignó un valor ponderado; considerando clasificaciones ya establecidas y el valor ponderado con base en la bibliografía (Quispe Medina, 2005; Guevara, 2006; Bonachea Pico, 2006; CENAPRED, 2010).

#### **3.4.1 Pendientes**

Con el DEM a través de su visualización en un software y con la ayuda de una herramienta, se obtuvieron las pendientes en las montañas del área de estudio, visualizando la inclinación de las laderas; después se le hizo una reclasificación con los valores de la Tabla 3.1, basado en diferentes autores que consideran los grados de la pendiente, proyectándolos al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14; en formato ráster, con un tamaño de celda de 5x5 m.

#### **3.4.2 Rumbos**

A partir del DEM y un software, se logró realizar la capa de rumbos. Ésta marca la orientación con respecto al norte que manejan las laderas, se le hizo una reclasificación con base en los datos de la Tabla 3.1, proyectándolo al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14; en formato ráster, con un tamaño de celda de 5x5 m.

#### **3.4.3 Relieve**

Esta capa se obtuvo a partir de la extensión “landform classification” elaborada por Jeff Jennes. Se calcula un Índice de Posición Topográfica (TPI), a partir del DEM;

clasifica las celdas por su elevación y proporciona un método simple y repetible para cuantificar el paisaje en posición de la pendiente y el relieve (Jenness, 2006), proyectándolo al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14; en formato raster, con un tamaño de celda de 5x5 m.

#### **3.4.4 Litología**

Tomando como referencia la capa geológica de INEGI en unión con los datos del SGM en formato “shape”, se obtuvo el dato del tipo de roca, que se rasterizó a un tamaño de celda de 5x5 m; y se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14; se clasificó de acuerdo con la resistencia de la roca, siguiendo el método de González de Vallejo (2002), tomando los valores bajos para rocas como calizas, y los valores altos para las formaciones de granulometría fina, fracturada y lajeada, como arcillas, lutitas y areniscas.

#### **3.4.5 Fallas**

Se tomó la capa de fallas y fracturas, que fue digitalizada a partir de los datos de las cartas geológico-mineras del SGM. Se le asignó un área de influencia, como lo marca CENAPRED – Atlas de Riesgo de Tamaulipas, de 20 m para fracturas y de 50 m para fallas, se rasterizó a un tamaño de celda de 5x5 m, se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14, clasificándolo según los valores de la Tabla 3.1, agregando un polígono que cubriera toda la zona de estudio con un valor cero, para que no se vieran afectadas las demás capas al sumarse.

#### **3.4.6 Echados**

La capa de echado fue elaborada a partir de la digitalización de datos geológicos de las cartas geológico-mineras del SGM; convertidos en puntos, éstos se interpolaron con el método IDW (Inverse Distance Weighted, distancia inversa ponderada), agregando los ejes de los pliegues como barrera, suponiendo que el rumbo y el buzamiento de la capa geológica es influenciada por este aspecto. Se rasterizó a un tamaño de celda de 5x5 m, y se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14, clasificándolo según los valores de la Tabla 3.1.

### **3.4.7 Edafología**

Tomando la capa de suelos de INEGI, en formato “shape”, se tomaron los atributos referentes al tipo de suelo según la textura y la fase física, para obtener un valor de erodabilidad; se rasterizó este valor obtenido a un tamaño de celda de 5x5 m, se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14, clasificándolo según los valores de la Tabla 3.1.

### **3.4.8 Cobertura vegetal**

Se utilizó una capa de cobertura vegetal en formato “shape” de INEGI, la que se convirtió en ráster a un tamaño de celda de 5x5 m, a partir del tipo de cobertura; se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14, y se clasificó con los datos de la Tabla 3.1.

### **3.4.9 Orden hidrológico**

Se tomó el “shape” de la red hidrográfica de INEGI, en el que se muestran los escurrimientos y los ríos de diferente orden, como vector línea. Se le agregó un área de influencia alrededor de la línea, según el número de orden; por ejemplo, 20 m para orden 1, 40 m para orden 2, 60 m para orden 3, 80 m para orden 4 y 100 m para orden 5 ó mayor; se rasterizó a un tamaño de celda de 5x5 m, se proyectó al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM, Zona 14, clasificándolo según los valores de la Tabla 3.1, agregando un polígono del tamaño de la zona de estudio con el valor cero para toda el área ajena a la red hidrográfica, con el fin de no alterar el resultado.

De acuerdo a la bibliografía que se menciona en el capítulo 2, se tomaron como base algunos datos para asignar valores a las capas obtenidas, para que todas estuvieran en el mismo sistema numérico y poder sumarse. La tabla 3.1 muestra los valores utilizados para cada capa utilizada.

Tabla 3.1. Valores utilizados en las diferentes capas generadas.

Concepto	Clasificación	Valor Relativo	Concepto	Clasificación	Valor Relativo
<b>Pendiente</b>	0° - 15°	1	<b>Echado de Discontinuidad</b>	0° - 10°	1
	15° - 25 °	2		10° - 30°	2
	25° - 35°	3		30° - 60°	3
	35° - 45°	4		60° - 90°	4
	45° - <	5		90° - <	5
<b>Rumbo</b>	0° - 45°	1	<b>Fallas</b>	0° - 45°	1
	45° - 90°	2		45° - 90°	2
	90° - 135°	2		90° - 135°	3
	135° - 180°	3		135° - 180°	2
	180° - 225°	1		180° - 225°	1
	225° - 360°	3		225° - 360°	3
<b>Landform</b>	Valle, llanura	1	<b>Cobertura Vegetal</b>	Vegetación intensa	1
	Escurremientos	2		Vegetación moderada	2
		3		Cultivos	3
	Colinas, lomas	4		Zona urbana	4
	Crestas	5		Deforestación	5
<b>Litología</b>	Cuarzo, gabro, basalto	1	<b>Orden Hidrológico</b>	Orden 1	1
	Caliza	2		Orden 2	2
	Conglomerado, mármol, brecha sedimentaria	3		Orden 3	3
	Lutita-arenisca	4		Orden 4	4
	Caliza-lutita, lutitas, aluvión, yeso	5		Orden 5	5
			<b>Precipitación</b>	0 - 50 mm	1
<b>Edafología</b>	Muy bajo	1		50 - 100 mm	2
	Bajo	2		100 - 200	3
	Medio	3		200 - 300	4
	Alto	4		300 - <	5
	Muy alto	5			

### 3.4.10 Precipitación

Los datos de precipitación se trabajaron tomando la máxima precipitación en el mes, de cada mes y por cada año de registro. Se elaboraron Tablas y gráficas por estación con los datos de precipitaciones máximas anuales, como lo muestra la Figura 3.12, donde se observan las precipitaciones máximas para diferentes estaciones de diferentes años. Se trabajó con los datos de las precipitaciones

máximas anuales, para darle una distribución más aceptable, a partir de diferentes distribuciones de probabilidad como: Normal, Log Normal, Exponencial, Gamma, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III y Valores Extremos. De los resultados obtenidos se eligió la ecuación que presentó el menor error en el análisis o que cumplió en la mayoría de los casos. Con el ajuste de los datos de precipitación por medio de la ecuación elegida, se proyectaron las alturas de precipitación ( $h_p$ ) y la intensidad ( $i$ ) para diferentes  $T_r$ , según el método propuesto por Campos (1990), en el que se recomienda usar el método de Bell para periodos de retorno de 10 años o menos; y el método de Cheng-Lung Chen para 10 años o más (D. Campos, 1990; Guerra Cobian, 1999; Ibañez-Castillo, et al. 2011).

Con los datos de precipitaciones máximas, intensidades y alturas de precipitación para diversos periodos de retorno se elaboraron capas de información con las características ya señaladas. Se realizaron Interpolaciones de las precipitaciones registradas por estación, para cubrir el área requerida; se analizaron los resultados obtenidos para utilizar la mejor interpolación, siendo IDW (interpolación mediante distancia inversa ponderada), y Kriging (método de interpolación) las que presentaron mejores resultados (Burrough & McDonnell, 1998).

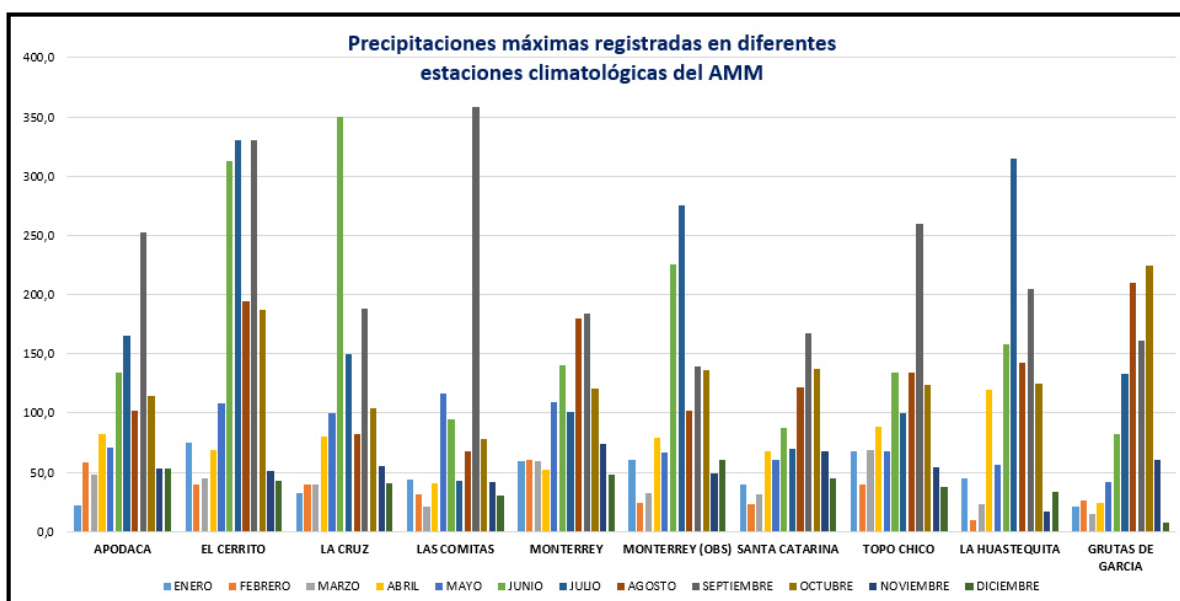


Figura 3.12. Precipitaciones máximas registradas por mes para diferentes estaciones climatológicas dentro del AMM.

### **3.4.11 Recorridos en campo**

Para corroborar la información obtenida, se realizaron visitas de campo a los sitios señalados como peligrosos, donde se hizo un reconocimiento del lugar, del tipo de roca que presenta, la pendiente del talud, la vegetación, el uso de suelo, intemperismo, las laderas que estaban expuestas debido a alteraciones antropogénicas, los cortes de taludes, asentamientos humanos, entre otros datos que fueran de gran ayuda, validando y documentando la información obtenida y elaborando un expediente fotográfico de cada sitio visitado (ver anexos).

### **3.4.12 Inventario**

De igual forma se realizó un estudio de derrumbes dentro del AMM, considerando la fecha del suceso en algunos casos y su respectiva ubicación. Revisando información destacada sobre estos hechos en diversas fuentes (periódicos, libros, documentos oficiales, atlas de riesgo, revistas científicas, informes técnicos, noticieros, imágenes, etc.). Con estos datos se revisó su coordenada geográfica, elaborando una Tabla con toda la información, misma que sirvió para generar un mapa con los sitios de derrumbes registrados, el cual fue de ayuda para compararlo con los resultados obtenidos y así validar los resultados arrojados por el modelo.

## **3.5 Integración del modelo**

La integración del modelo se desarrolló mediante un software, haciendo una suma lineal para dar un valor de Índice de peligro de deslizamientos. Se modelaron los resultados obtenidos, de manera que se pudieran apreciar los cambios con las diferentes capas elaboradas. El resultado muestra zonas de peligro por inestabilidad de ladera dentro del AMM. El mapa de derrumbes, sirvió para corroborar y verificar los sitios señalados como zonas de peligro, en lugares donde ya hay evidencia de estos derrumbes y ajustar los resultados a las demás zonas. Estas zonas se clasifican, de acuerdo con el peligro, en muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

## **4. RESULTADOS**

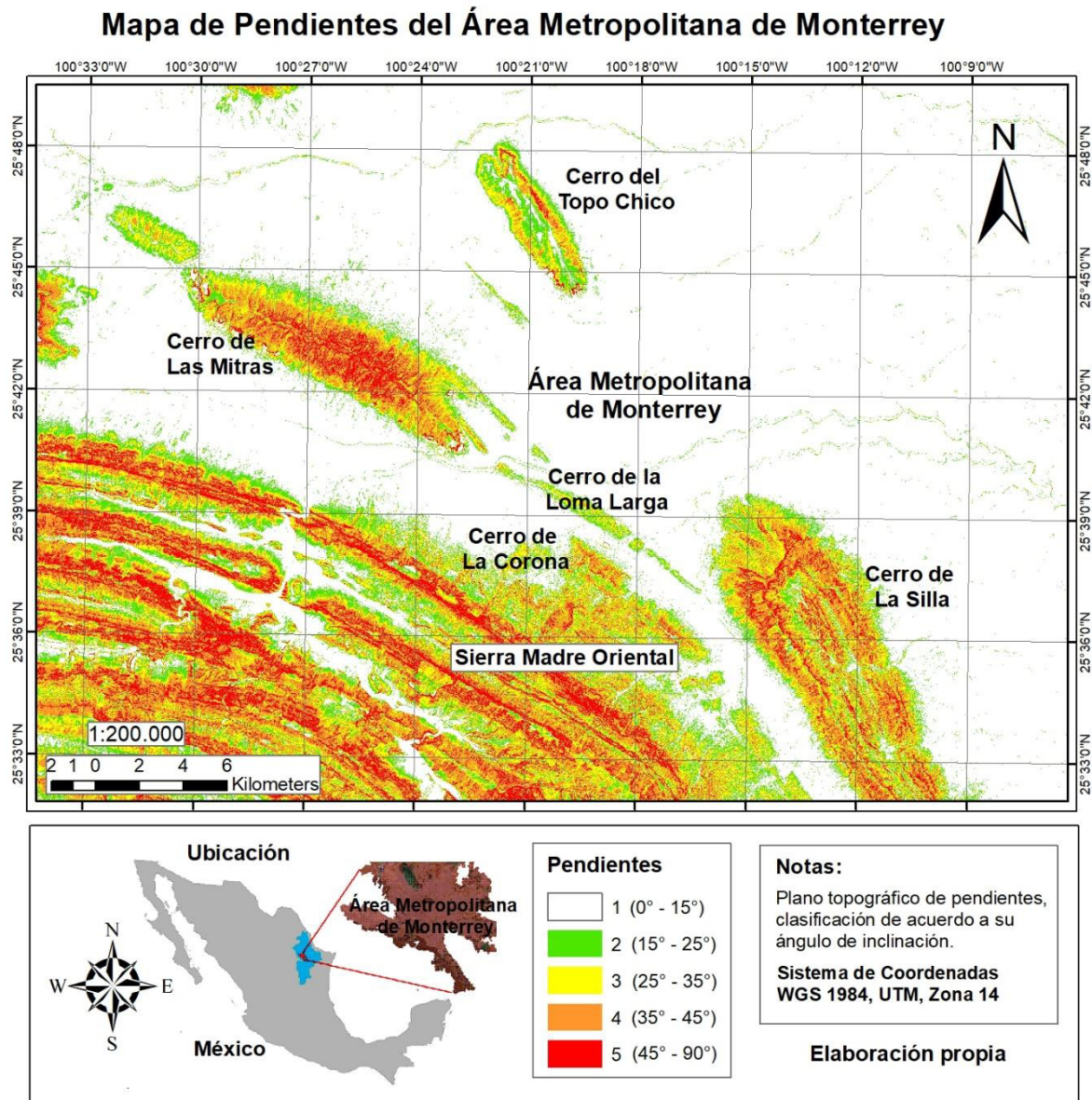
### **4.1 Mapas Generados**

En la elaboración del modelo se generaron diversas capas vectoriales, que se obtuvieron con los insumos descritos en la parte de metodología y de herramientas del software, siguiendo los requerimientos establecidos como son: el formato, el sistema de coordenadas y la reclasificación de valores. Se presentan como mapas a continuación y se describen algunos datos importantes de ellos.

#### **4.1.1 Pendiente**

El mapa de pendientes en el AMM se observa en la Figura 4.1, el que se obtuvo del DEM y la herramienta “slope” del programa. Se le hizo una reclasificación partiendo de los grados de la pendiente y se le asignó un valor relativo del 1 al 5. La topografía del área de estudio es determinante, ya que la pendiente se relaciona con las rupturas, pues los sitios con fuerte grado de pendiente presentan mayor probabilidad de producir movimientos gravitacionales de masas (Hernández Mena, 2008).

Se encontraron fuertes pendientes en las montañas del AMM, como en el cerro del Topo Chico en Monterrey y Escobedo; el cerro de Las Mitras en Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina; el cerro de la Corona en San Pedro Garza García; el cerro de La Silla en Monterrey y Guadalupe, y parte de la Sierra Madre Oriental en Monterrey, San Pedro Garza García y Santa Catarina. La mayoría de estas pendientes se deben a la topografía natural de la zona; pero otras son el resultado de procesos antropológicos.



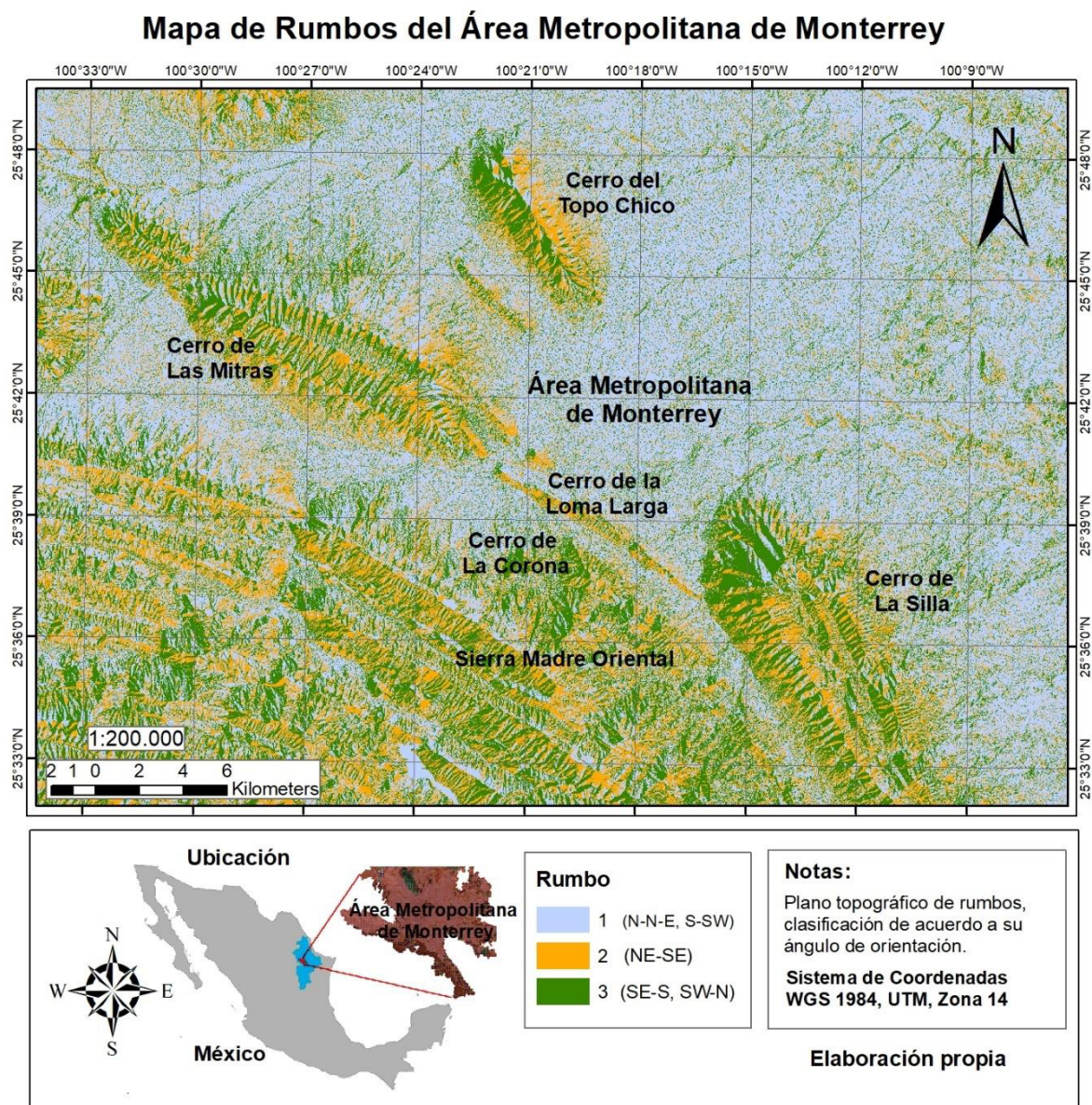
*Figura 4.1. Mapa de Pendientes dentro del AMM.*

#### 4.1.2 Rumbos

El mapa de rumbos se muestra en la Figura 4.2. Éste indica la orientación que tienen las laderas en las montañas con respecto al norte, se deriva del DEM y de una herramienta del programa; se reclasificaron los resultados obtenidos de acuerdo con la dirección que presentan. Ésta influye debido a que algunas zonas pueden estar más expuestas al sol, al viento, a la lluvia, a fenómenos naturales, a procesos antropológicos, que causan humedad, incremento de la vegetación e intemperismo



en las rocas expuestas. En el caso de algún desprendimiento, deslave, deslizamiento, etc., sirve conocer la dirección que presenta para ubicar las posibles causas de ello y también para detectar la dirección que puedan tomar y verificar si hay áreas vulnerables que pudieran sufrir algún riesgo.



*Figura 4.2. Mapa de Rumbos dentro del AMM.*



### 4.1.3 Relieve

El mapa de relieve sirve para conocer la forma de la topografía del lugar a través de su elevación, clasificando el paisaje de acuerdo con las celdas vecinales en ambas posiciones de la pendiente y el terreno; es decir, si hay valle, llanura, cañones, pendiente media, riscos, crestas, cimas de montañas, etc. Se le dio la clasificación según los resultados obtenidos de acuerdo con el tipo de relieve, en relación con la mayor probabilidad de peligro. En la Figura 4.3 se muestra el mapa.

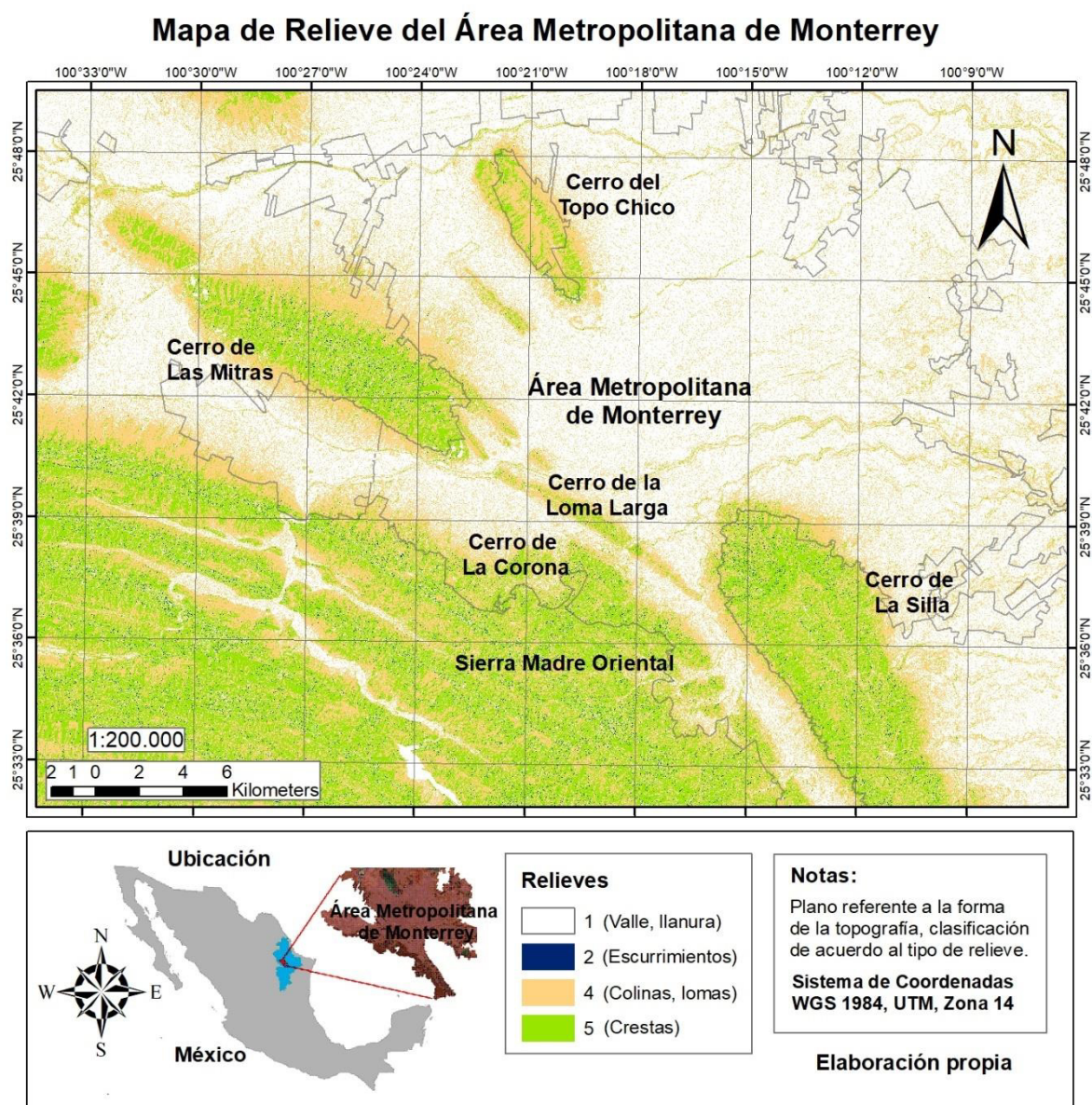


Figura 4.3. Mapa de Relieve dentro del AMM.

#### 4.1.4 Litología

El tipo de roca se clasificó según las propiedades de resistencia. En la Figura 4.4 se aprecia el mapa de Litología, el que informa sobre el tipo de roca que existe en la zona de estudio ya clasificada, destacando la presencia de calizas, lutitas, caliza-lutita, aluvi3n y conglomerados; siendo las lutitas y las caliza-lutita las que presentan mayor probabilidad de inestabilidad, localizadas en el municipio de San Pedro Garza García y en colindancia con Monterrey.

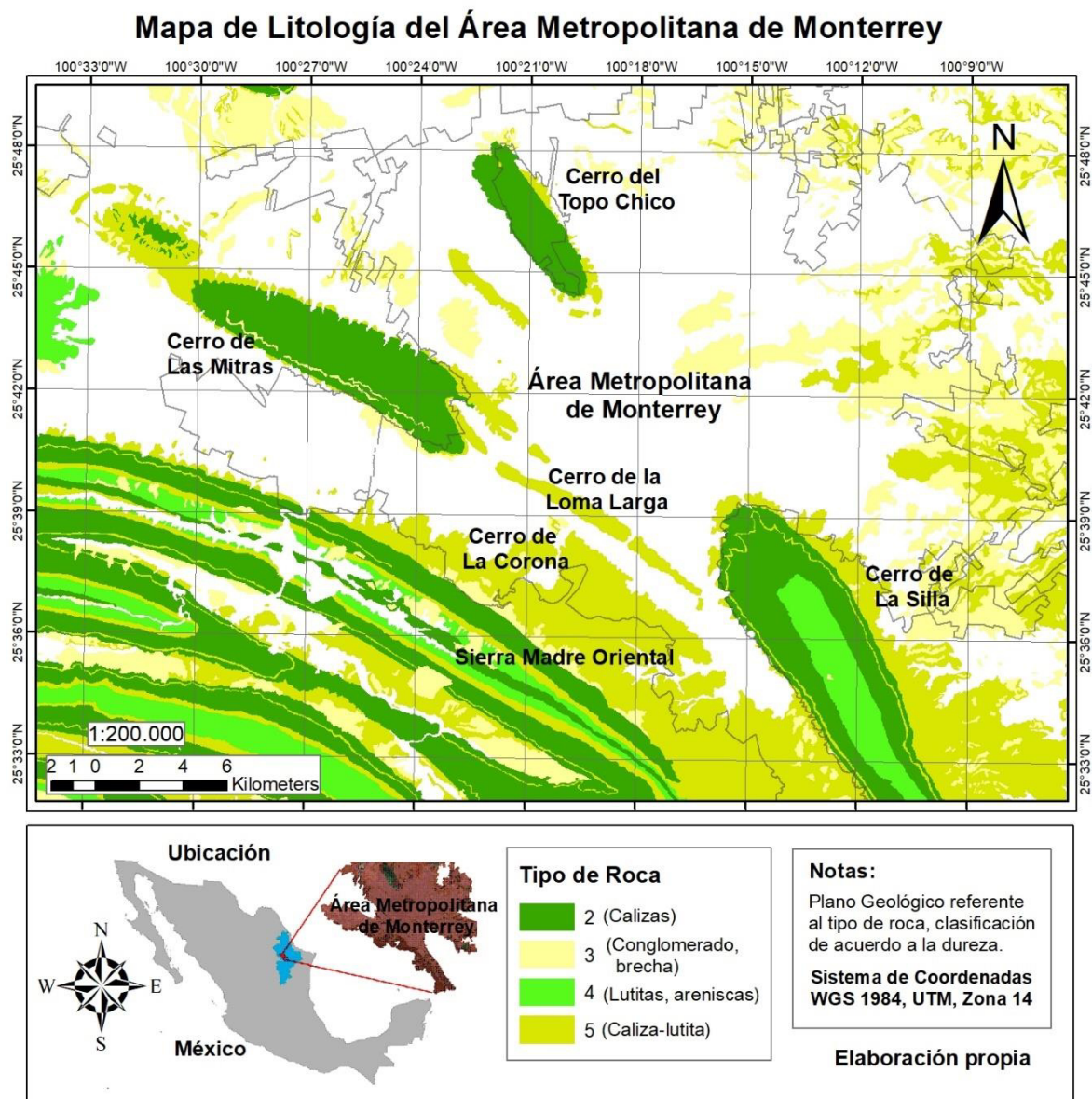


Figura 4.4. Mapa de Litología dentro del AMM.



#### 4.1.5 Edafología

Se analizaron las propiedades físicas, textura y el grado de erodabilidad de los suelos, para clasificarlos y sumar la capa de edafología al modelo final. En la Figura 4.5 se observa el mapa de edafología ya clasificado para el AMM, donde se observa que la zona del cerro de la Loma Larga (en los municipios de Monterrey y San Pedro Garza García) presenta áreas con alto grado de erodabilidad, los suelos que abundan en estos lugares son litosol y phaeozem.

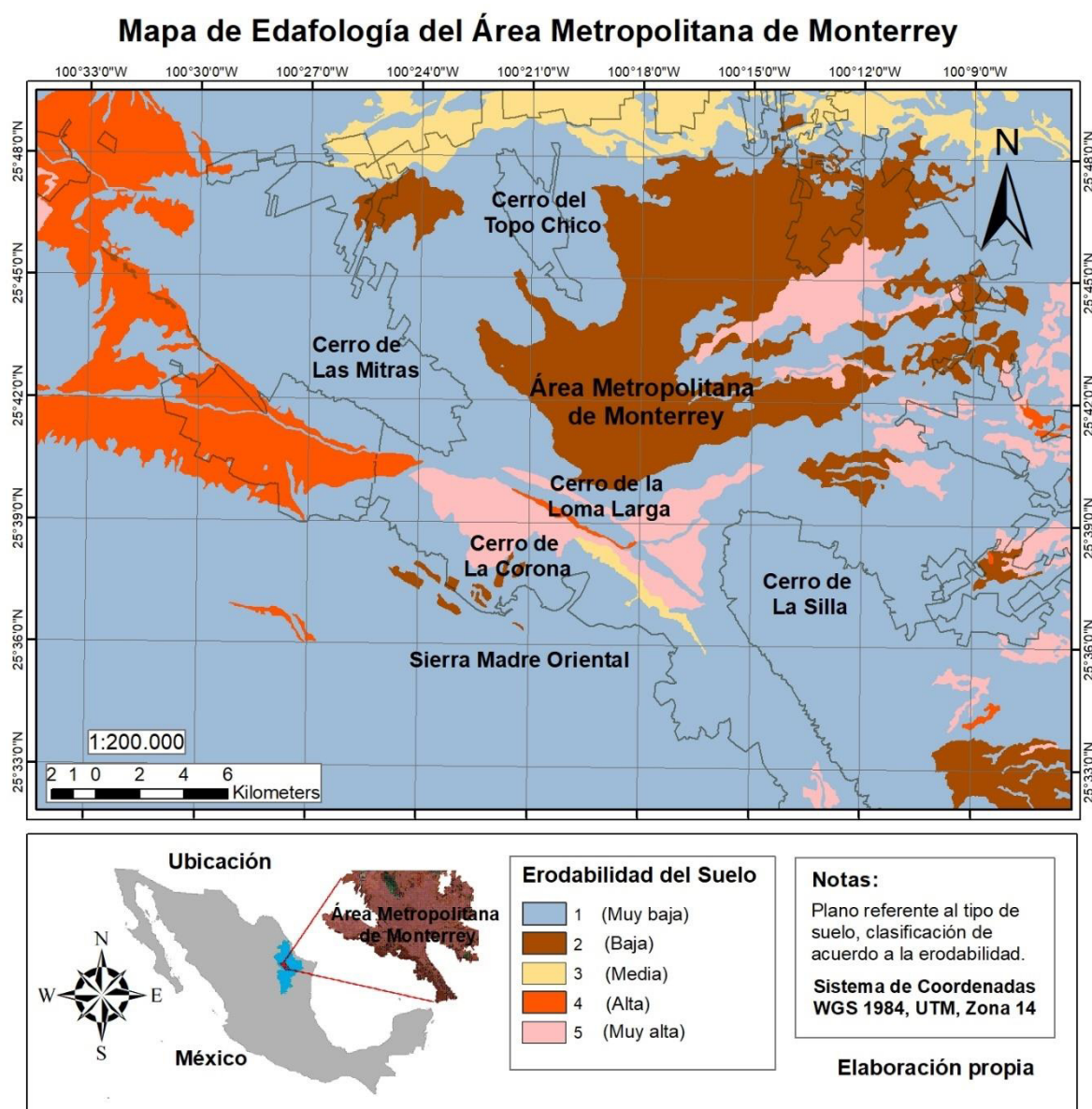


Figura 4.5. Mapa de edafología dentro del AMM.

#### 4.1.6 Echado

Las estructuras geológicas influyen en la inestabilidad de la ladera, los echados en este caso indican la inclinación o discontinuidad de la roca y la posibilidad de falla debido a la pendiente del talud, para ello se considera la diferencia angular entre el echado de la discontinuidad principal (proveniente de la estratificación), y la inclinación que presenta la ladera. En la Figura 4.6 se observa el comportamiento de esta discontinuidad en los cerros del AMM.

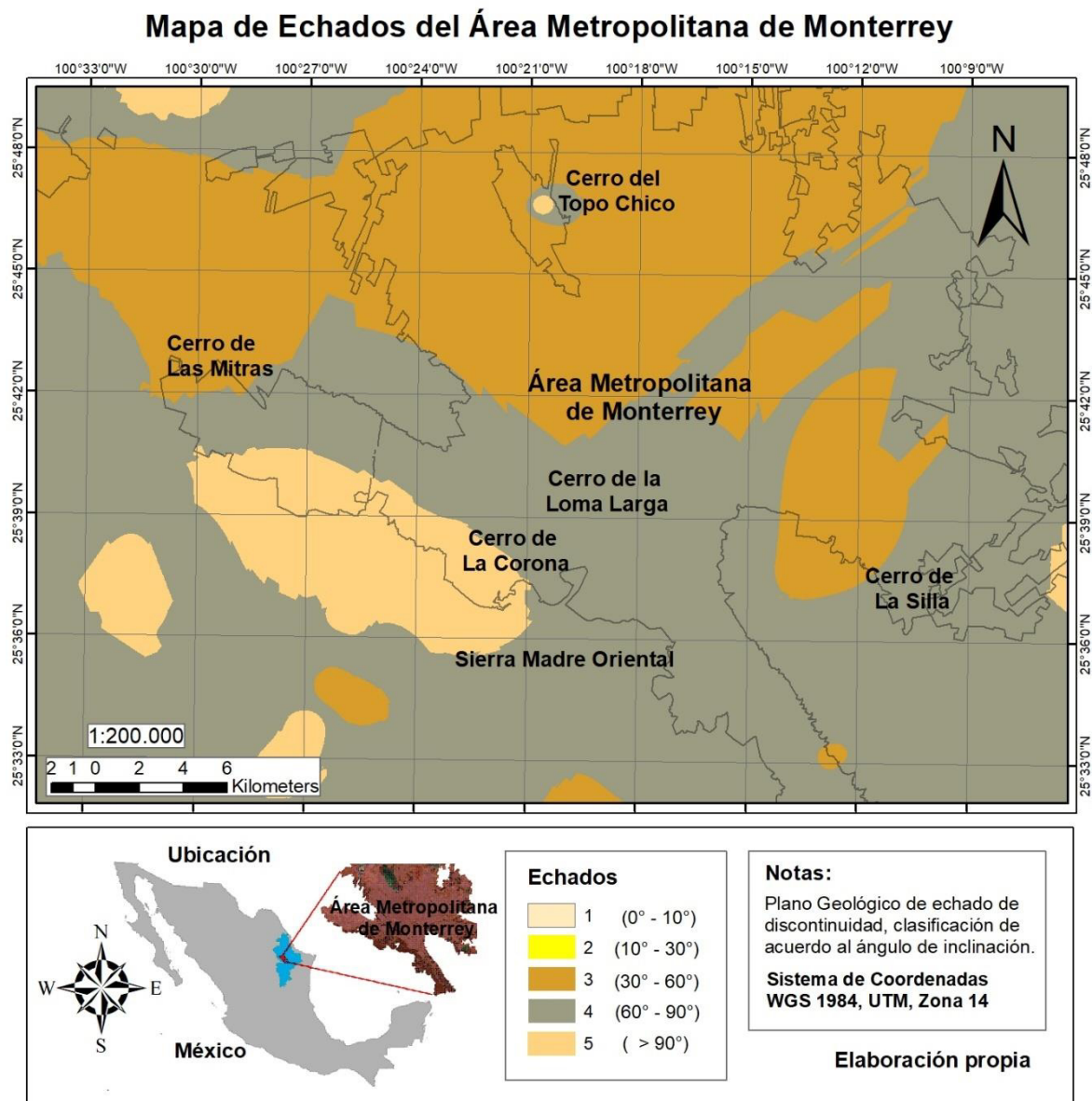


Figura 4.6. Mapa de echados dentro del AMM.



#### 4.1.7 Fallas y Fracturas

Para obtener esta capa se agregó un “buffer” alrededor de las fallas y fracturas, con la clasificación ya mencionada, agregando un polígono de valor cero para no afectar la suma de las capas. En la Figura 4.7 se observa el mapa donde se ubican las fallas y las fracturas en los cerros del AMM; de las cuales se muestra que, en la Sierra Madre Oriental dentro del municipio de San Pedro Garza García, existe la presencia de diversas fallas en zonas residenciales. A través de ellas puede haber filtraciones en las montañas, lo cual puede alterar la roca y provocar daños.

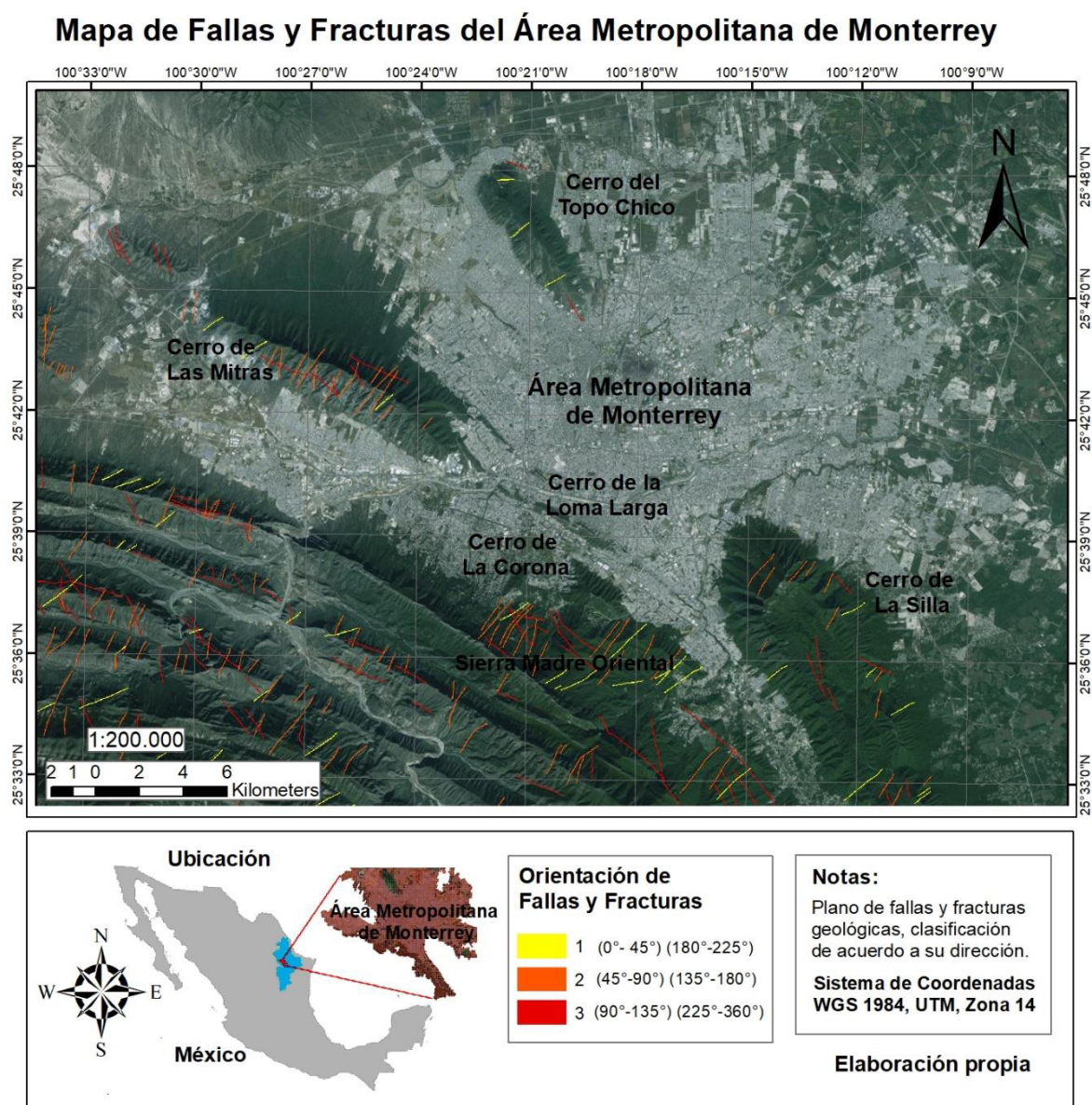


Figura 4.7. Mapa de fallas y fracturas dentro del AMM.

Las fallas y fracturas son un factor de la estructura geológica que influye en la inestabilidad de laderas, creando bloques independientes propensos a movimientos como desprendimiento o deslizamiento, debido a cambios en el entorno, siendo un área propensa a peligro, según las condiciones donde se presente.

#### 4.1.8 Cobertura vegetal

En la Figura 4.8 se aprecia el mapa de cobertura vegetal con sus valores asignados, en el que se observa la mancha urbana y cómo algunos cerros han ido perdiendo áreas verdes, pasando a zonas urbanas o de vegetación moderada.

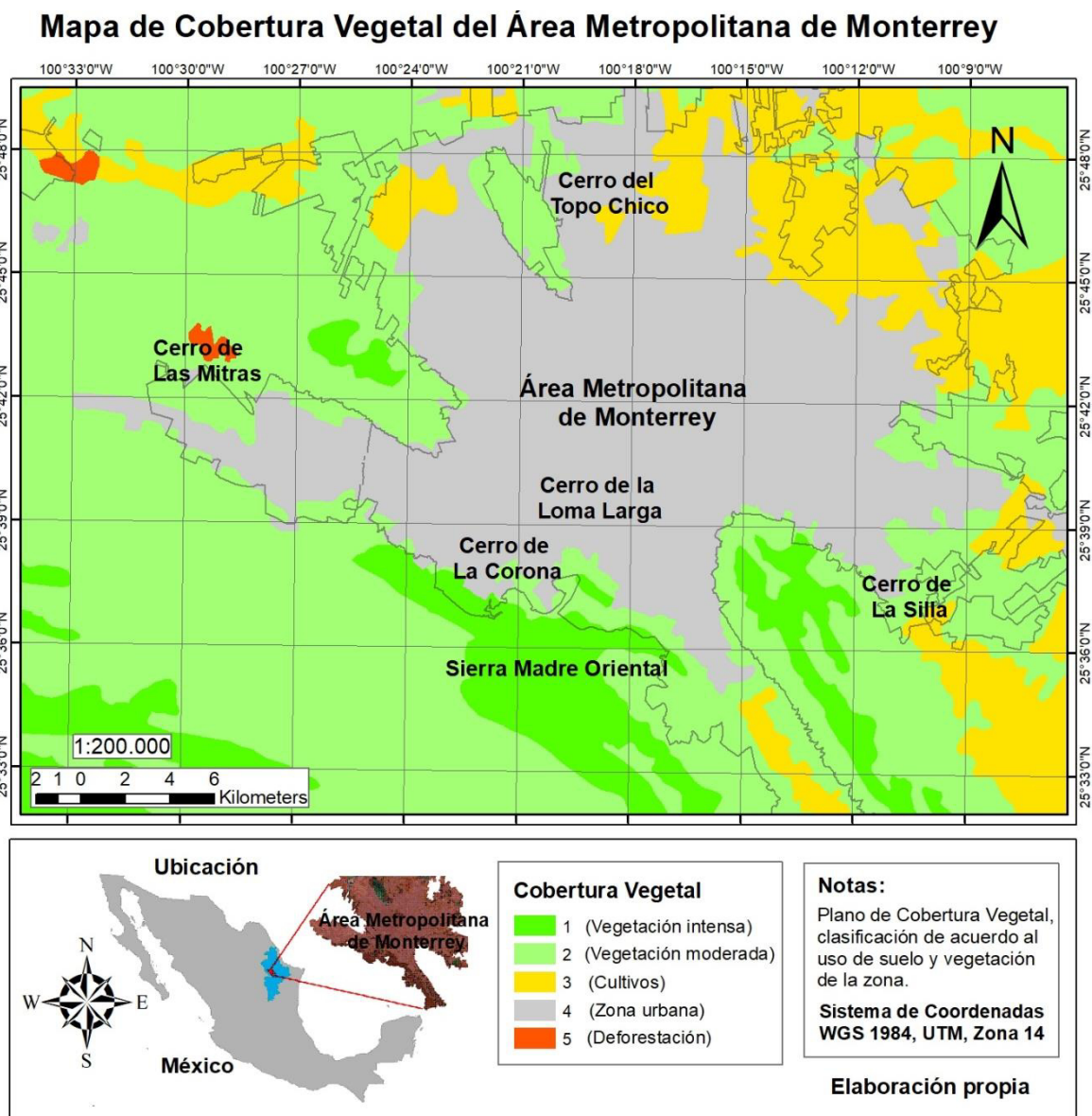


Figura 4.8. Mapa de Cobertura vegetal dentro del AMM.



El uso de suelo o cobertura vegetal es una gran condicionante en la elaboración del modelo, ya que se puede detectar si hay zonas descubiertas, urbanizadas, áreas verdes, vegetación intensa o moderada, entre otros usos, que, puedan influir en la inestabilidad de las laderas y afectar esas zonas ocasionando daños.

#### 4.1.9 Orden Hidrológico

En la Figura 4.9 se observa el mapa de los escurrimientos hidrológicos en el AMM, tomados de la Red Hidrográfica de INEGI. Existen diversos escurrimientos, los que pueden agrandarse por las precipitaciones que se presentan en el AMM.

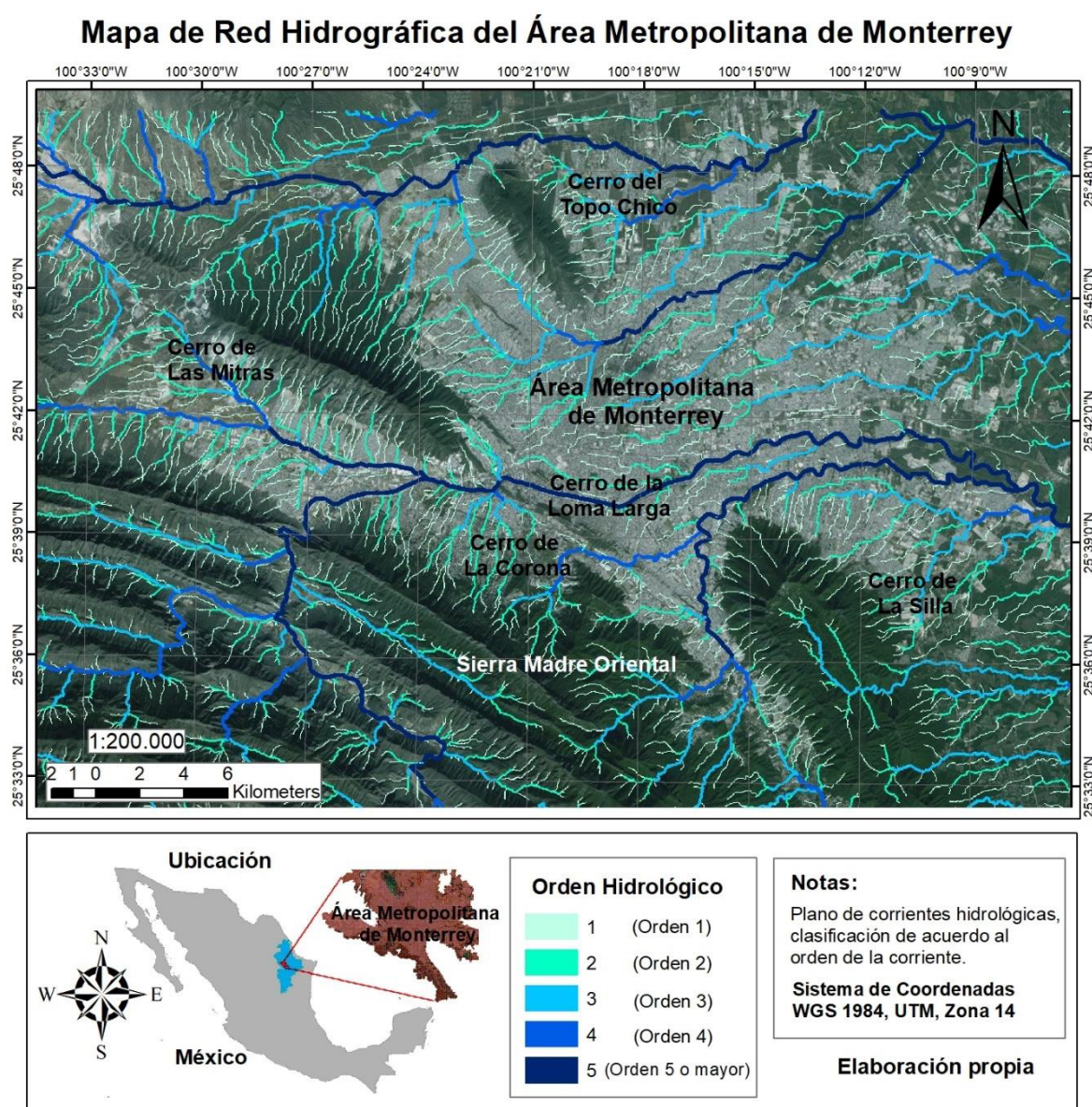


Figura 4.9. Tipo de orden en los diferentes cauces y escurrimientos dentro del AMM.



La ubicación geográfica de México, así como su topografía, influyen en el clima y en la disponibilidad de los recursos hídricos en el país (CONAGUA, 2015). Las precipitaciones influyen en los escurrimientos en las montañas y pueden ser un factor que ocasione inestabilidad en las laderas, debido a que puede erosionar el suelo o la roca en los taludes de las montañas, producir deslaves, flujos de lodo y escombros, entre otros (CENAPRED, 2001).

#### **4.1.10 Estaciones Climatológicas**

El mapa de ubicación de las estaciones climatológicas cercanas al AMM se muestra en la Figura 4.10-a. De manera general se destacan algunas estaciones dentro del AMM, como Apodaca, Topo Chico, Monterrey; en las periferias, como es el caso de Ejido Marín, Grutas de García, la Boca, etc., y también algunas del estado de Coahuila, por su cercanía a la zona de estudio, como Ramos Arizpe, Arteaga y Ciénega de la Purísima, entre otras.

De los datos de las estaciones climatológicas se extrajo la información necesaria para generar la Tabla 4.1. En ella se observa la precipitación máxima registrada por cada estación, así como la intensidad de precipitación, trabajada para diferentes periodos de retorno, de la tabla se puede destacar que existen precipitaciones registradas de gran cantidad de milímetros en altura de precipitación, mismas que pudieron ser provocadas por algún fenómeno meteorológico como son el caso de los huracanes; el AMM tiende a ser una zona que presenta fuertes lluvias en pequeños intervalos de tiempo, es por ello que la Tabla también muestra las intensidades para diversos periodos de retorno ( $T_r$ ) destacando 50, 100, 500 y 1000 años, lo cual se observa que son fuertes intensidades.

En la Figura 4.10-b se observa el mapa de ubicación de las estaciones climatológicas en una escala menor, donde se puede observar de cerca el AMM y las estaciones que hay en ella.

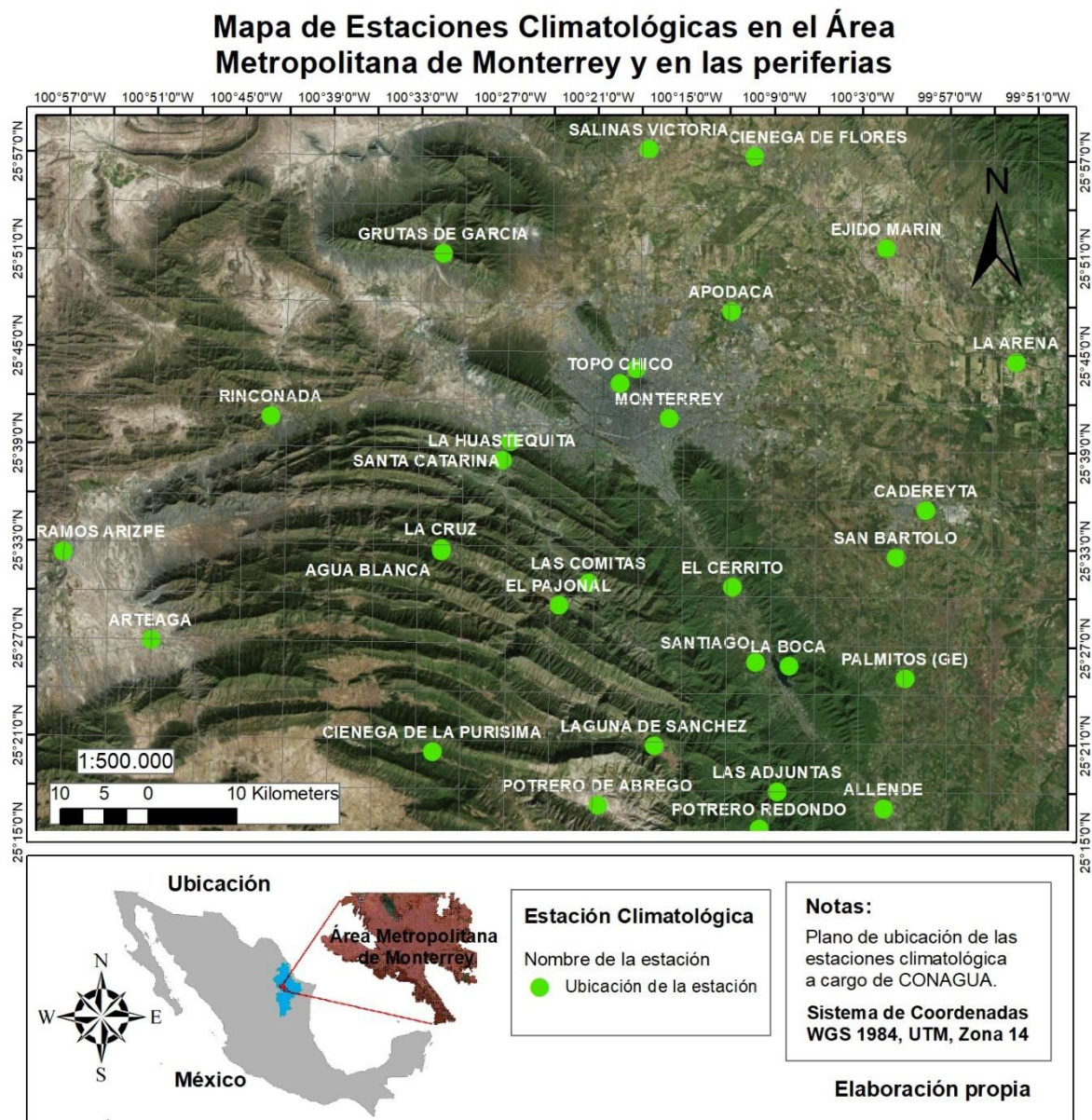


Figura 4.10-a. Ubicación de las estaciones climatológicas dentro del AMM y en sus alrededores en una escala mayor.

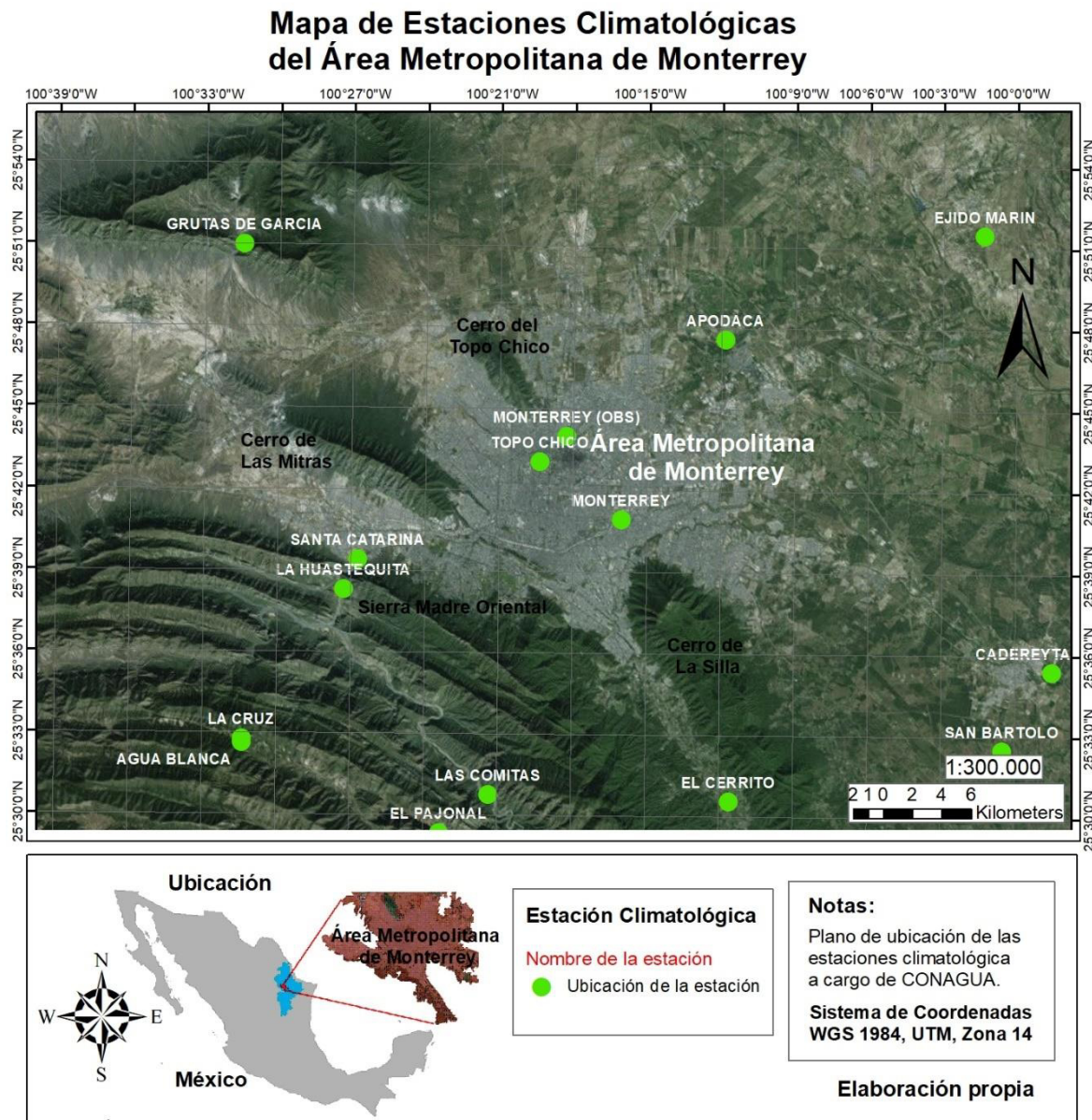
Tabla 4.1. Precipitación máxima registrada en las estaciones climatológicas dentro del AMM y la intensidad de precipitación para diferentes periodos de retorno.

No.	Nombre	Precip. Max.	Intensidad de Precipitación en mm/hr					
			Tr-2	Tr-10	Tr-50	Tr-100	Tr-500	Tr-1000
1	Arteaga	280.0	52.09	81.35	154.64	187.57	264.04	296.97
2	Ramos Arizpe	166.0	59.88	93.53	174.31	210.67	295.10	331.46
3	Potrero de Abrego	250.0	50.83	79.38	141.76	169.96	235.43	263.63

Continuación de la Tabla 4.1

4	Ciénega de la Purísima	250.0	68.82	107.49	190.92	228.66	316.29	354.03
5	Las Adjuntas	320.0	124.91	95.10	328.98	389.14	528.82	588.98
6	Agua Blanca	400.0	52.91	82.63	170.84	209.88	300.55	339.59
7	Allende	320.0	162.28	253.46	370.64	424.35	549.07	602.78
8	Apodaca	253.0	90.79	141.80	213.15	245.69	321.24	353.78
9	Cadereyta	192.5	121.86	190.32	232.48	253.07	300.88	321.48
10	Casillas	324.0	69.67	108.81	190.39	226.92	311.74	348.26
11	Ciénega de Flores	255.0	108.40	169.31	233.68	263.58	332.99	362.88
12	El Cerrito	330.5	145.76	227.65	341.77	393.83	514.71	566.78
13	E Pajonal	326.0	78.52	122.63	194.08	226.42	301.51	333.85
14	La Arena	275.8	97.41	152.14	224.24	257.23	333.85	366.85
15	La Cruz	350.0	61.64	96.27	190.45	232.24	329.27	371.07
16	Laguna de Sánchez	345.0	96.61	150.88	242.52	283.92	380.04	421.44
17	Las Comitas	358.5	61.46	96.00	199.91	245.89	352.65	398.64
18	Monterrey	183.9	100.80	157.43	209.39	233.78	290.41	314.80
19	Potrero Redondo	320.0	128.82	201.20	308.73	357.62	471.13	520.02
20	Monterrey (obs)	275.0	129.81	202.75	290.57	330.99	424.84	465.26
21	Rinconada	287.0	39.29	61.36	117.78	142.87	201.12	226.21
22	Santa Catarina	167.0	88.57	138.34	189.52	213.33	268.62	292.43
23	Topo Chico	260.0	90.20	140.87	216.47	250.83	330.61	364.97
24	Santiago	332.2	155.59	243.01	339.78	384.57	488.56	533.35
25	La Boca	389.3	165.58	258.60	374.84	428.21	552.13	605.50
26	La Huastequita	315.0	100.61	157.13	264.35	312.54	424.43	472.62
27	Ejido Marín	142.5	85.26	133.16	175.31	195.18	241.29	261.15
28	Grutas de García	225.0	83.29	131.03	247.30	299.06	419.23	470.98
29	Salinas Victoria	156.5	78.50	122.61	178.52	204.17	263.72	289.37
30	Palmitos (GE)	217.2	113.76	177.67	253.31	288.16	369.08	403.93
31	San Bartolo	257.7	114.26	178.46	256.28	292.08	375.20	411.00





*Figura 4.10-b. Ubicación de las estaciones climatológicas dentro del AMM y en sus alrededores.*

#### 4.1.11 Precipitaciones

La información de las estaciones climatológicas fue tratada con diferentes procedimientos estadísticos, como se mencionó en la metodología para obtener los datos de las precipitaciones. La Figura 4.11-a, muestra el mapa de las precipitaciones máximas registradas por estación climatológica, utilizando el método de interpolación IDW. En la Figura 4.11-b se observa el mapa de las precipitaciones máximas en el AMM, donde se empleó el método de interpolación

Kriging. Entre estas dos imágenes se puede comentar que el método IDW, según sus valores, a medida que se aleja en distancia, el valor puede ir aumentando o disminuyendo, según los valores vecinos; mientras que para el método de Kriging, se basa en relaciones estadísticas entre los puntos, uno los puntos dentro de un mismo radio y determina el valor de salida para cada ubicación. Este proceso es más tardado que el método IDW, pero presentó un resultado más convincente.

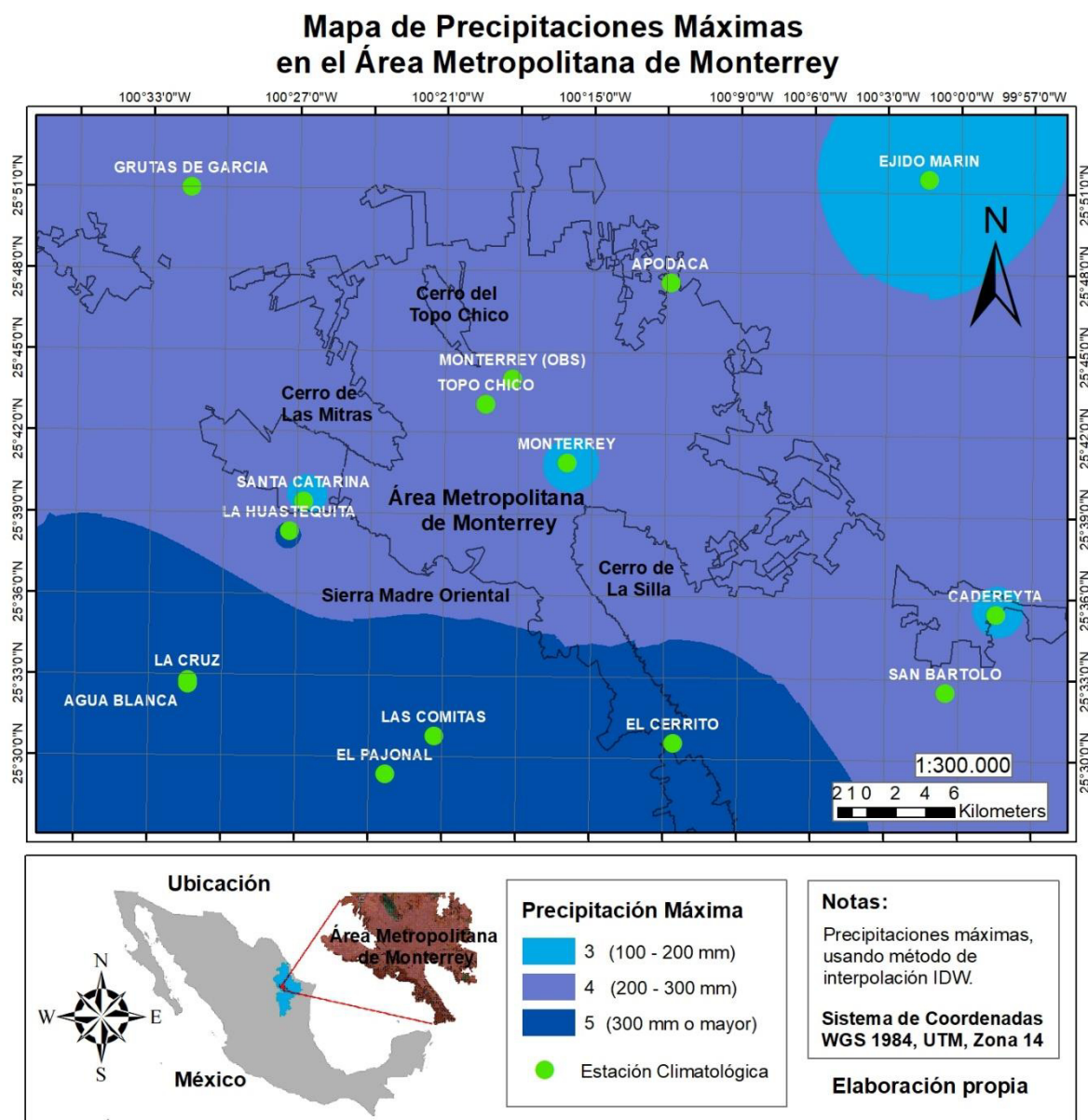


Figura 4.11-a. Precipitaciones máximas registradas en las estaciones climatológicas del AMM, usando el método de interpolación IDW.

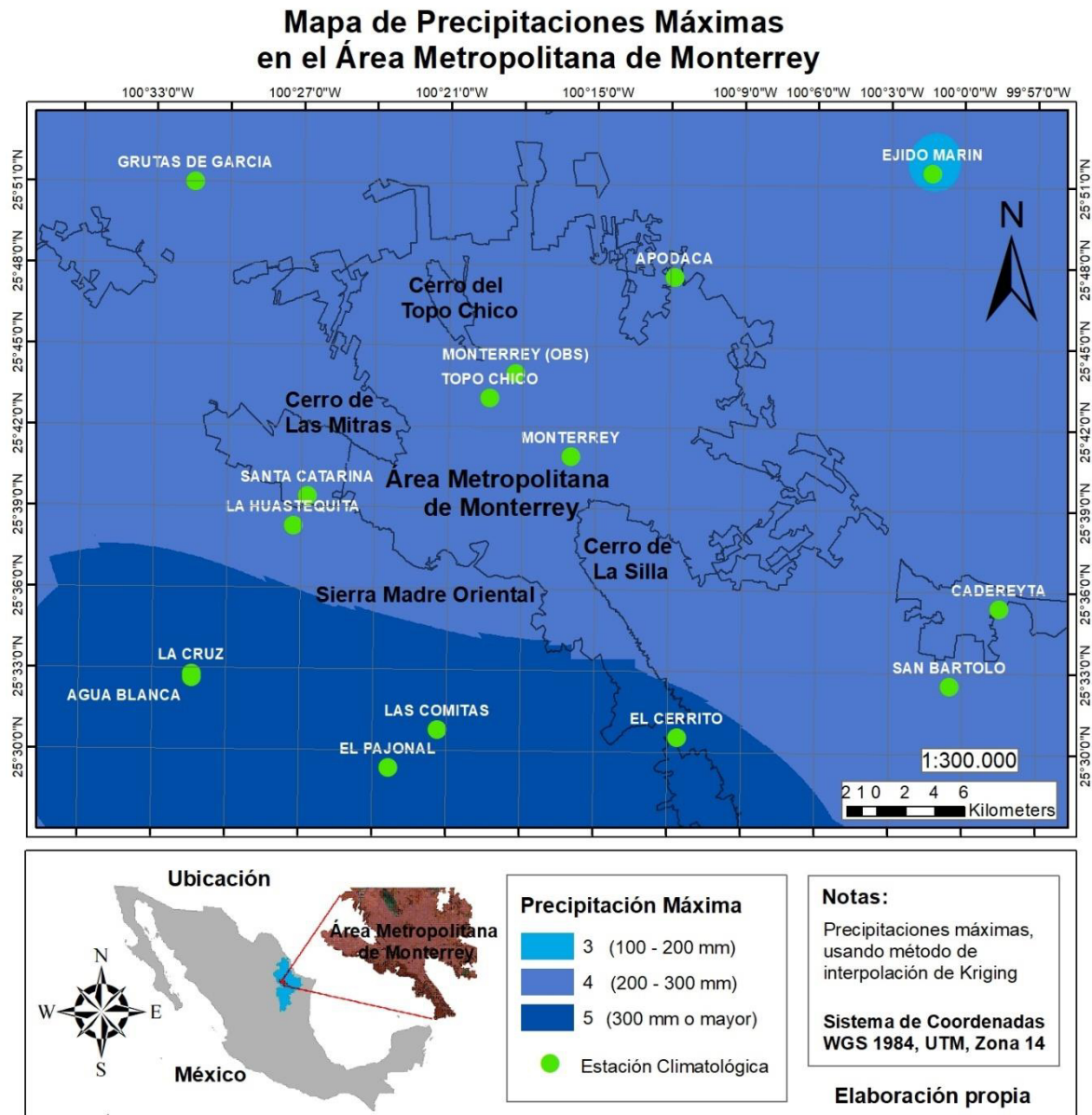


Figura 4.11-b. Precipitaciones máximas registradas en las estaciones climatológicas del AMM, usando el método de interpolación Kriging.

En las imágenes anteriores se observa que el AMM se encuentra en una zona donde se han registrado fuertes e intensas lluvias, según la reclasificación que se le dio; éstas rondan entre los 200 y 300 mm de precipitación. La CONAGUA clasifica como de “*lluvia intensa a extraordinaria*” a aquellas precipitaciones mayores que los 75 mm y las precipitaciones máximas de las estaciones climatológicas analizadas superan esta cifra.



Los datos de la intensidad de precipitación para diferentes Tr, se muestra en las figuras de la 4.12 a la 4.15, en los que es posible observar el comportamiento de la precipitación para diferentes Tr, siendo en este caso el de 2 años como el más bajo analizado y el de 1000 años el más alto.

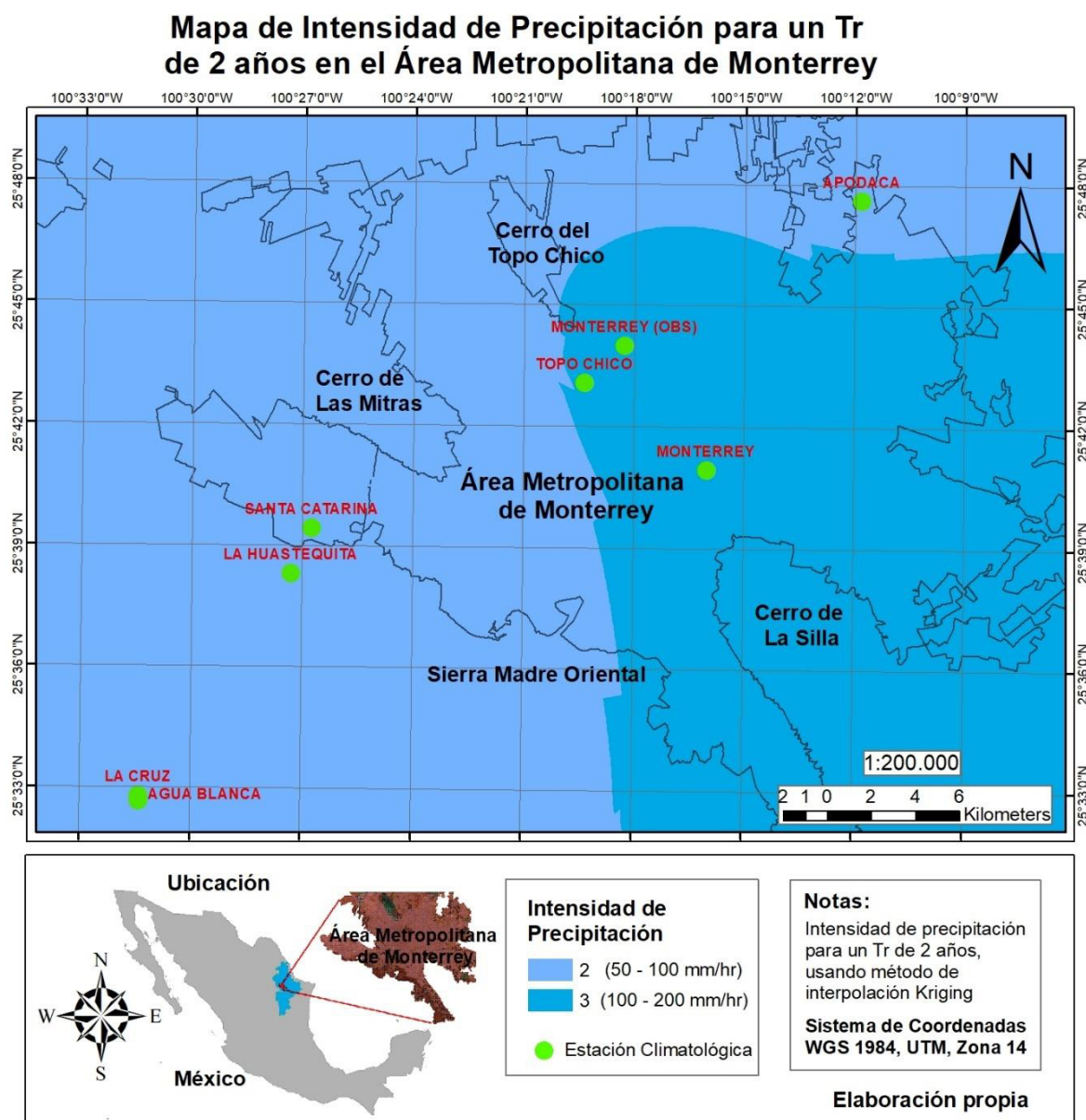


Figura 4.12. Intensidad de precipitación para un Tr de 2 años, por estación climática dentro del AMM.

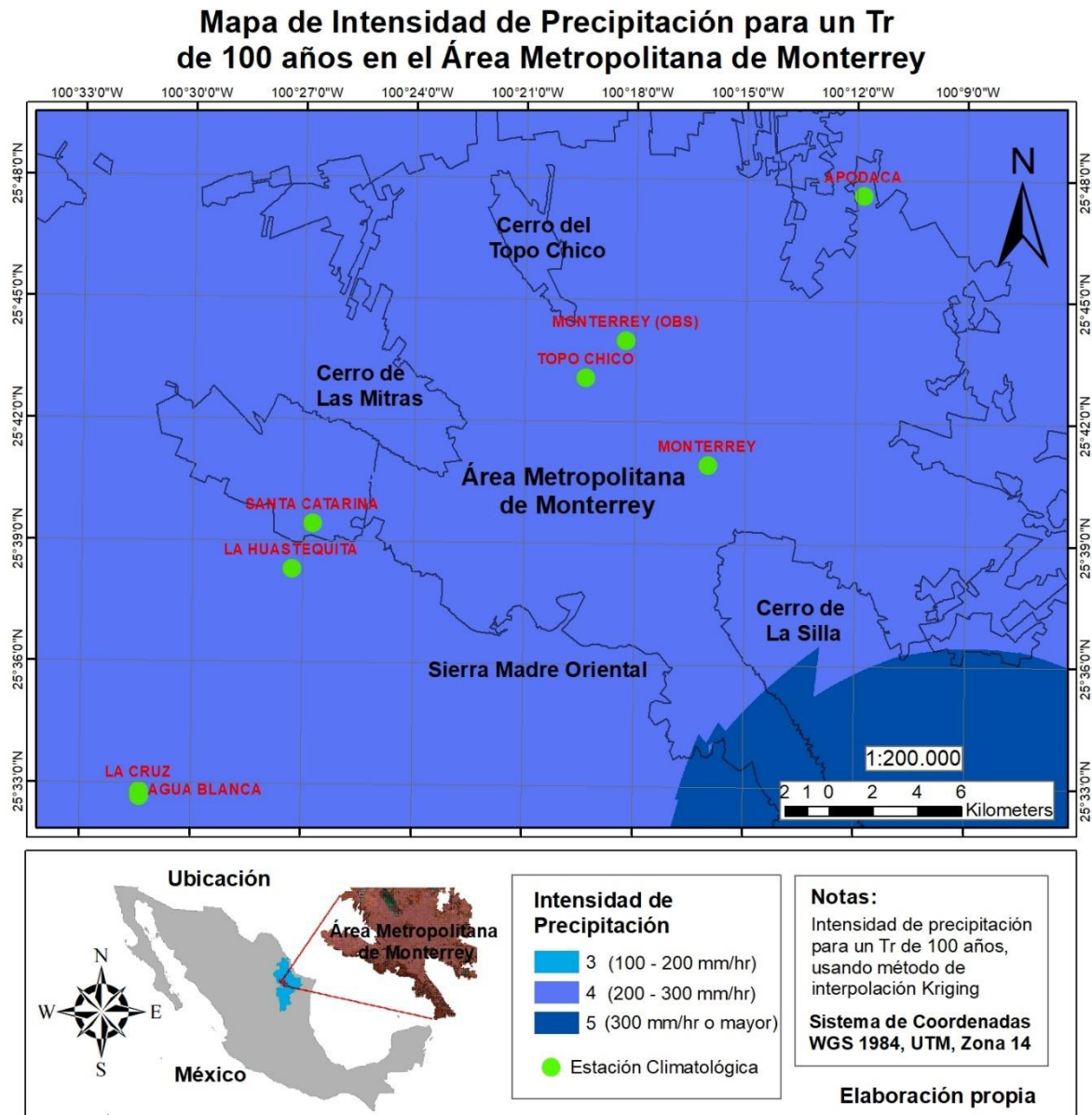


Figura 4.13. Intensidad de precipitación para un Tr de 100 años, por estación climatológica dentro del AMM.



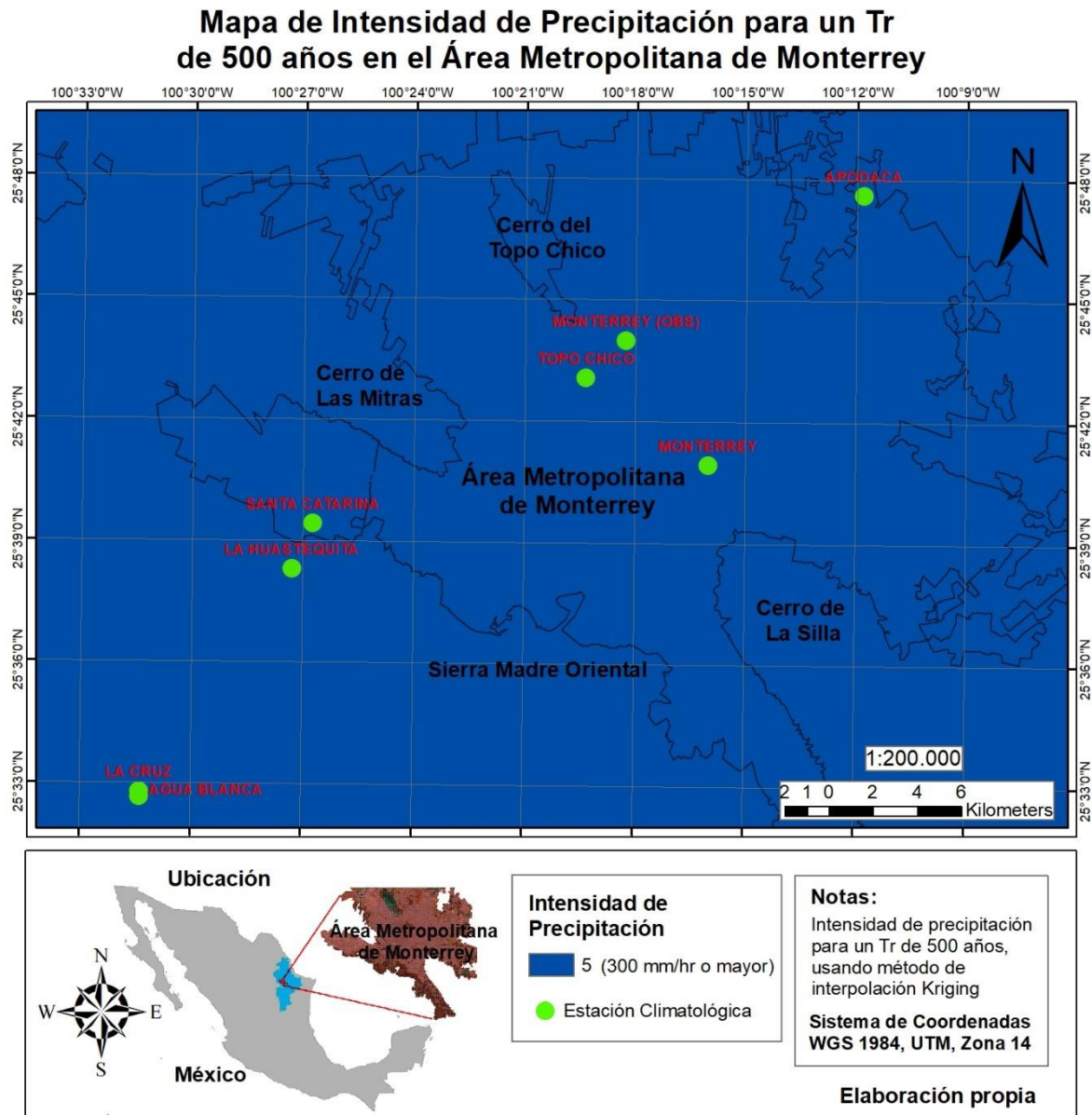


Figura 4.14. Intensidad de precipitación para un periodo Tr de 500 años, por estación climatológica dentro del AMM.

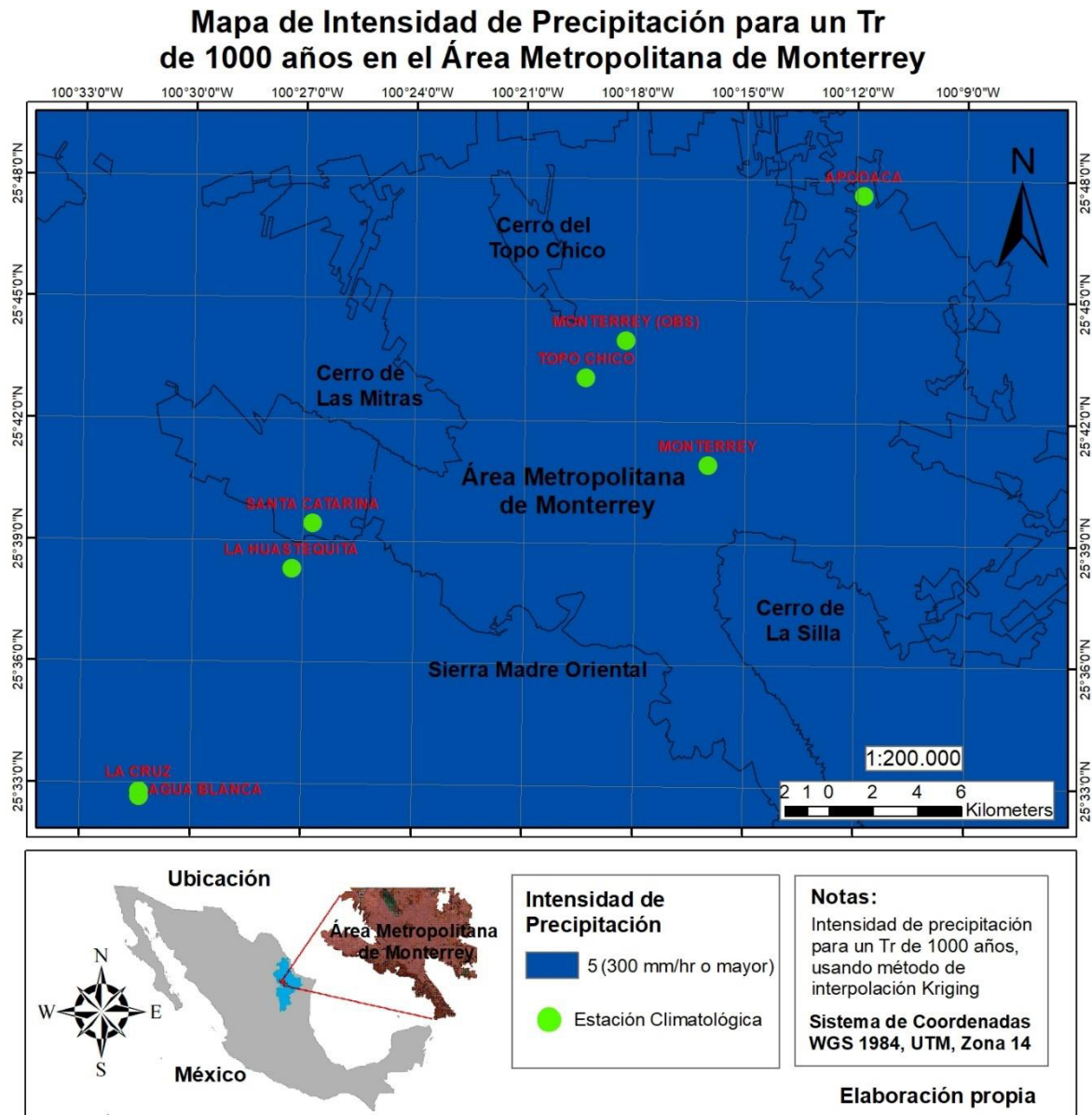
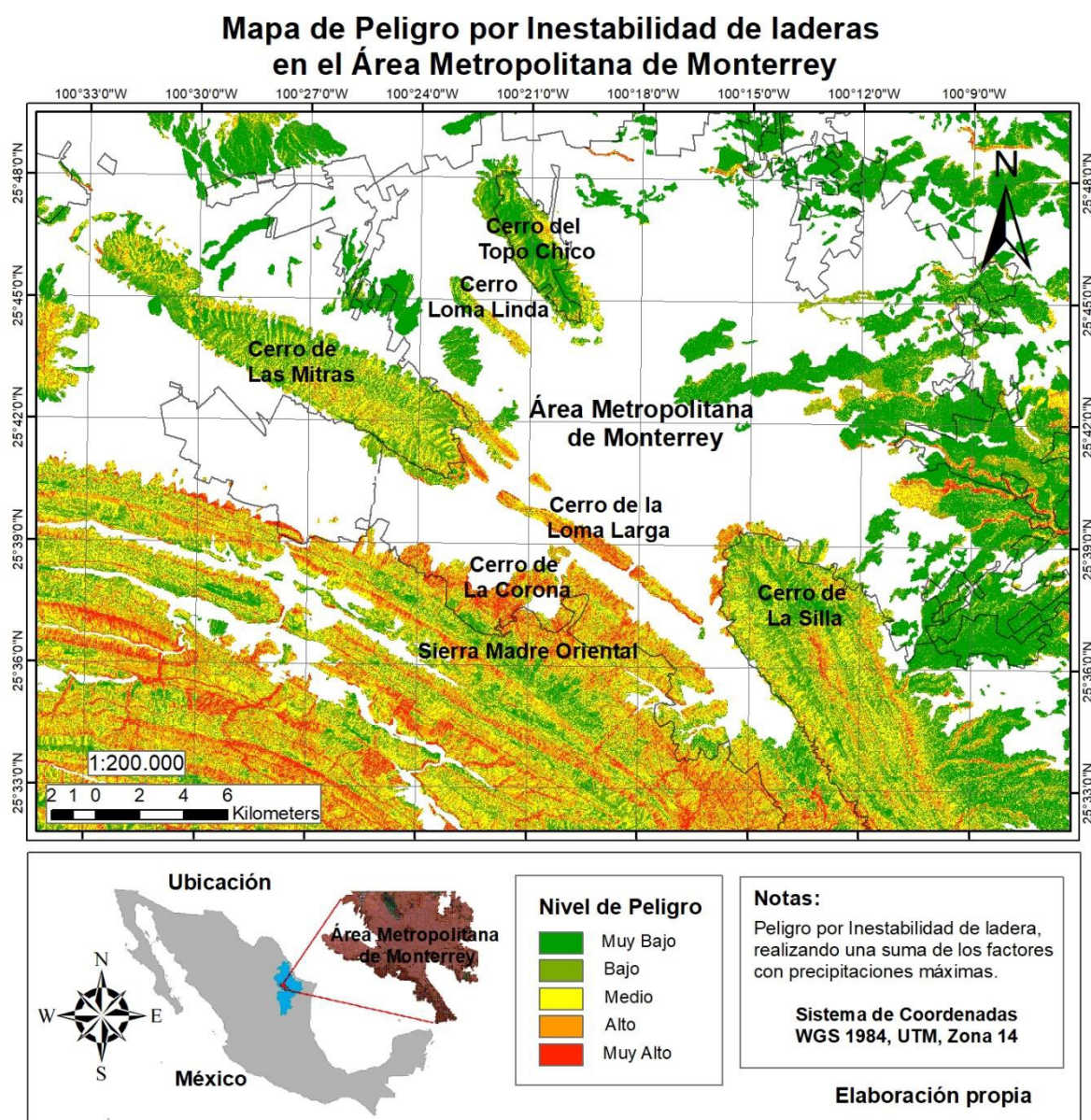


Figura 4.15. Intensidad de precipitación para un periodo Tr de 1000 años, por estación climatológica dentro del AMM.

## 4.2 Mapa de Peligro

En la Figura 4.16 se expone el mapa de peligro por los procesos de remoción en masa dentro del AMM. Las diferentes capas vectoriales utilizadas fueron procesadas, se realizó una suma lineal y se clasificaron los valores obtenidos. Este mapa muestra las zonas que presentaron mayor probabilidad de peligro en una

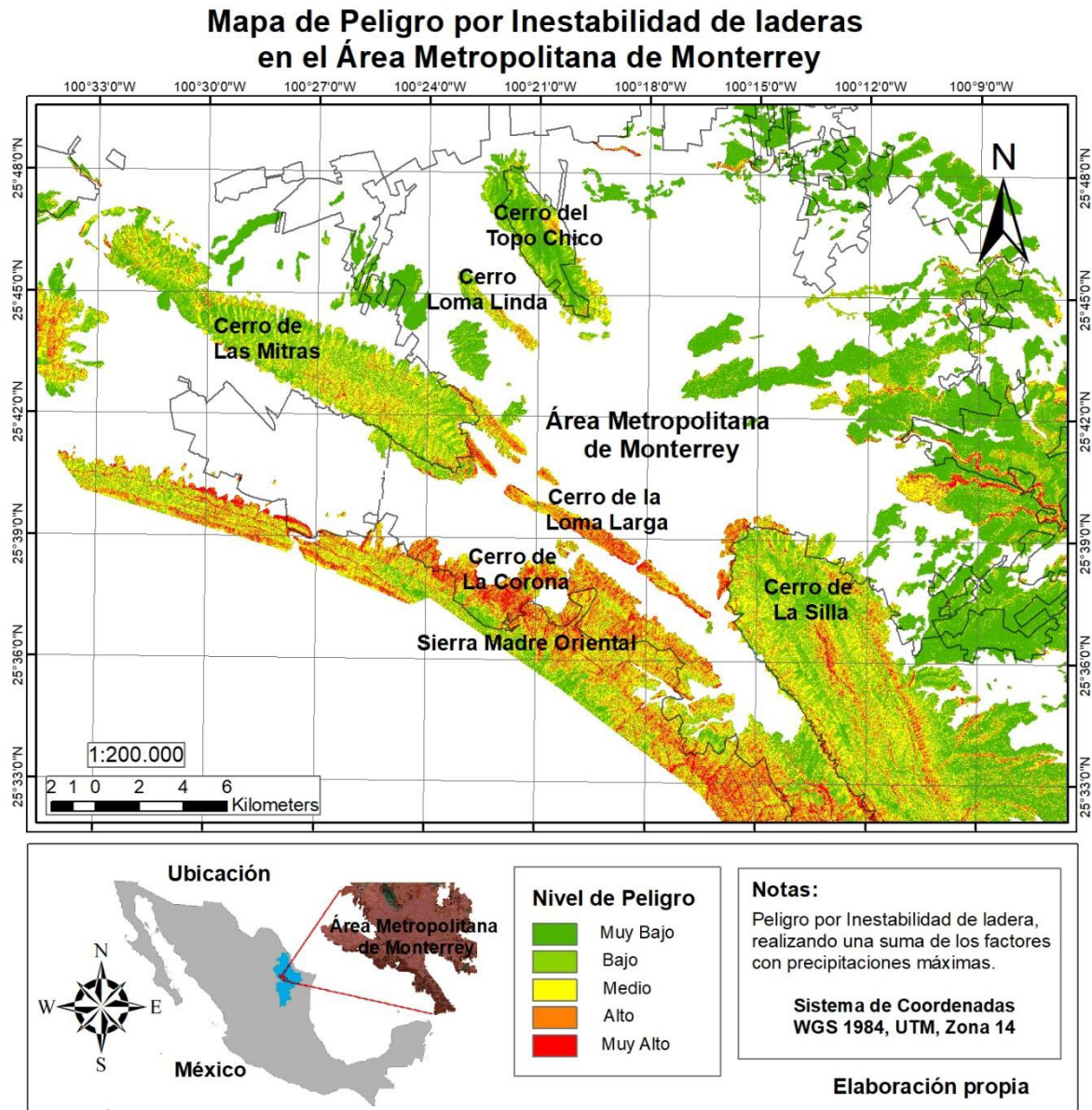
escala de muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (tomando el color verde para peligro muy bajo y bajo, y hacia el color naranja y rojo a alto y muy alto).



*Figura 4.16. Mapa de Peligro por inestabilidad de laderas en el AMM.*

Gran parte de la Sierra Madre Oriental no se encuentra urbanizada como se ve en la Figura 4.16, misma que, queda fuera del AMM, por lo que se cortó el mapa, delimitándolo a la zona metropolitana, quedando exclusivamente la zona urbana y las montañas que hay dentro o que limitan con ella, siendo un área de estudio de 1,183.25 km<sup>2</sup>, dando como resultado el mapa que se observa en la Figura 4.17.





*Figura 4.17. Mapa de Peligro por inestabilidad de laderas en el AMM.*

Las partes bajas de las montañas son zonas urbanizadas en su mayoría y presentan peligro por inestabilidad de ladera de medio a muy alto. A simple vista se observa el cerro de la Loma larga, localizado entre los municipios de San Pedro Garza García y Monterrey, el cual se encuentra urbanizado con casas-habitación, vialidades y edificios departamentales, entre otros. Otro caso es la Sierra Madre Oriental, en el municipio de San Pedro Garza García, que también se encuentra urbanizado y cuenta con casas tipo residencial, vialidades, comercios, centros

educativos, etc. De este mapa se calcularon las áreas por cada nivel de peligro para el AMM, como lo muestra la Tabla 4.2. En ella se mencionan las clases de peligro según su nivel y el área en km<sup>2</sup> y el porcentaje correspondiente a cada nivel.

*Tabla 4.2. Áreas de cada nivel de peligro en el AMM en km<sup>2</sup>.*

<b>No.</b>	<b>Nivel de Peligro</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentajes (%)</b>
<b>1</b>	Muy bajo	188.14	34.95
<b>2</b>	Bajo	120.71	22.43
<b>3</b>	Medio	127.53	23.70
<b>4</b>	Alto	72.90	13.54
<b>5</b>	Muy alto	28.97	5.38
	<b>Total</b>	<b>538.25</b>	<b>100.00</b>

El área tomada para este modelo es de 1,183.25 km<sup>2</sup>, el 45% del área de estudio presentó peligro por inestabilidad de ladera, esto equivale a 538.25 km<sup>2</sup>. Este peligro puede ir de muy bajo a muy alto. En la tabla anterior se puede destacar que, del total de peligro presentado, el 42% corresponde a un nivel de peligro de medio, alto y muy alto; el nivel alto y muy alto de peligro presentaron un área menor de peligro como resultado del modelo, sin embargo, sumados llegan a 100 km<sup>2</sup>, siendo un área grande hablando de territorio urbanizado y semi-urbanizado, que puede tener la presencia de casas-habitación, comercios, áreas recreativas, vialidades y centros educativos, entre otros.

### **4.3 Visitas de Campo**

A la par de realizar el modelo de Inestabilidad de Laderas para el AMM, se llevaron, a cabo recorridos en el campo por los diferentes cerros y montañas del AMM, como fueron: el cerro del Topo Chico, Las Mitras y La Silla, en el municipio de Monterrey, y el cerro de La Corona, en San Pedro Garza García, En los que se recabó información fotográfica sobre las condiciones de las laderas y se comparó con los resultados que estaba arrojando el modelo. Se destaca la presencia de

asentamientos urbanos en las faldas de los cerros, vialidades, edificios departamentales, comercios, etc., así como corte de taludes, inclinaciones con alto grado de pendiente, rocas expuestas, desprendimientos de rocas, escurrimientos superficiales y a través de la roca, áreas con densa vegetación y otras deforestadas.

#### 4.3.1 Cerro del Topo Chico

El cerro del Topo Chico, ubicado entre los municipios de Monterrey, San Nicolás de los Garza y General Escobedo, presentó zonas de peligro medio, alto y muy alto en las laderas sur del cerro, donde se encuentran casas-habitación, mismas que son asentamientos de tipo regular e irregular, en sitios que fueron utilizados por empresas pedreras para la extracción de materiales. En la Figura 4.18 se observan imágenes de cómo se encuentran las laderas sur del cerro.



*Figura 4.18. Imágenes de las laderas sur en el cerro del Topo Chico (imagen superior tomada de google Earth, imagen inferior de un vuelo con dron, derecha imagen propia).*

De la imagen anterior se destaca el tipo de roca (calizas), que se encuentra expuesta y meteorizada. Los taludes muestran una inclinación cercana a los 90°.



Existen asentamientos humanos, hay indicios de caídos y desprendimientos de rocas. En la Figura 4.19 se muestran resultados obtenidos del mapa de peligro en el cerro del Topo Chico, donde se aprecia en color anaranjado y rojo, las zonas de alto y muy alto peligro, algunas de ellas fueron sitios utilizados para la extracción de materiales y ahora con viviendas, como se observa en la Figura 4.20.

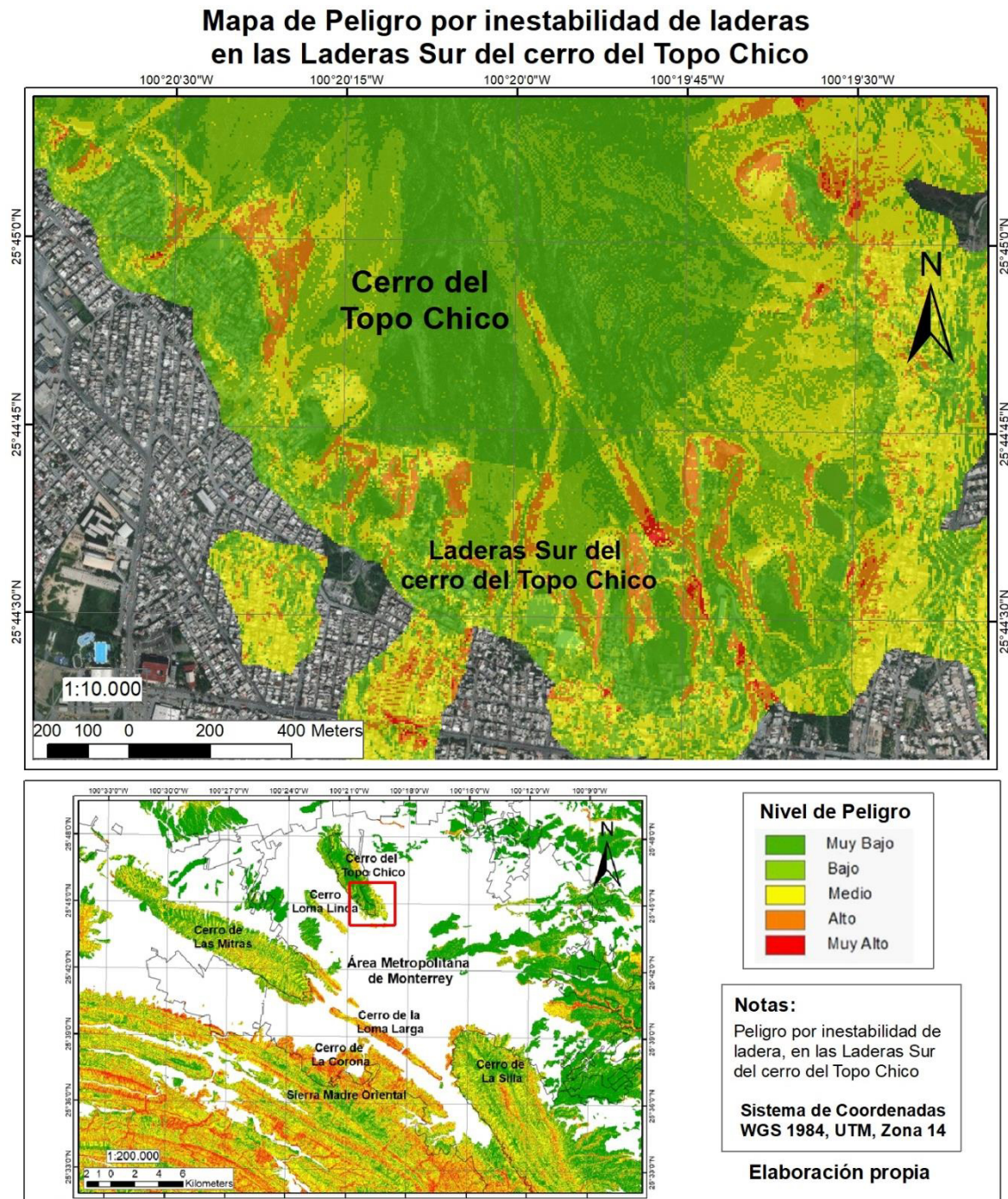


Figura 4.19. Mapa de peligro en las laderas sur del cerro del Topo Chico.

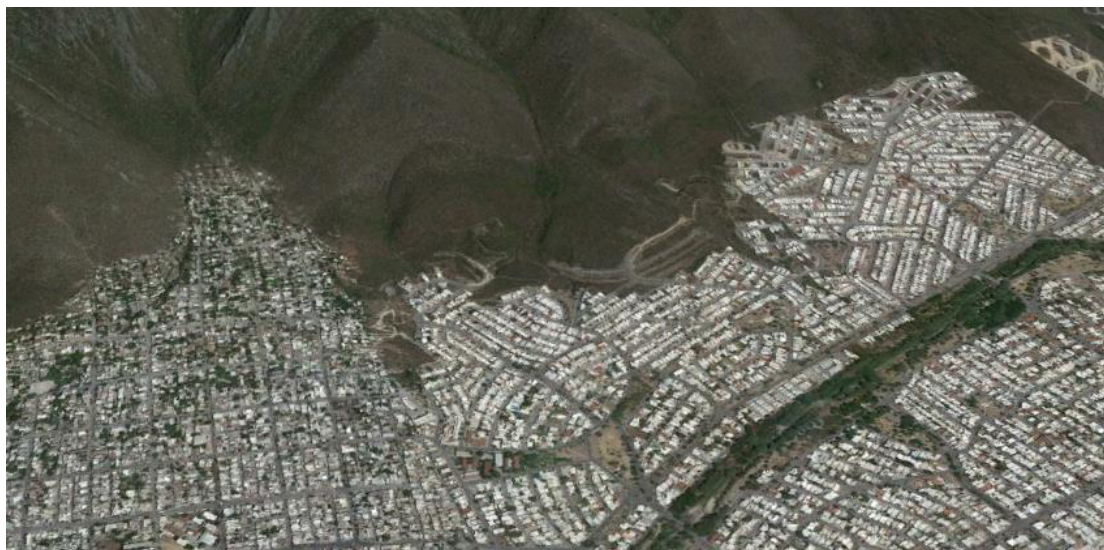




*Figura 4.20. Laderas en el cerro del Topo Chico.*

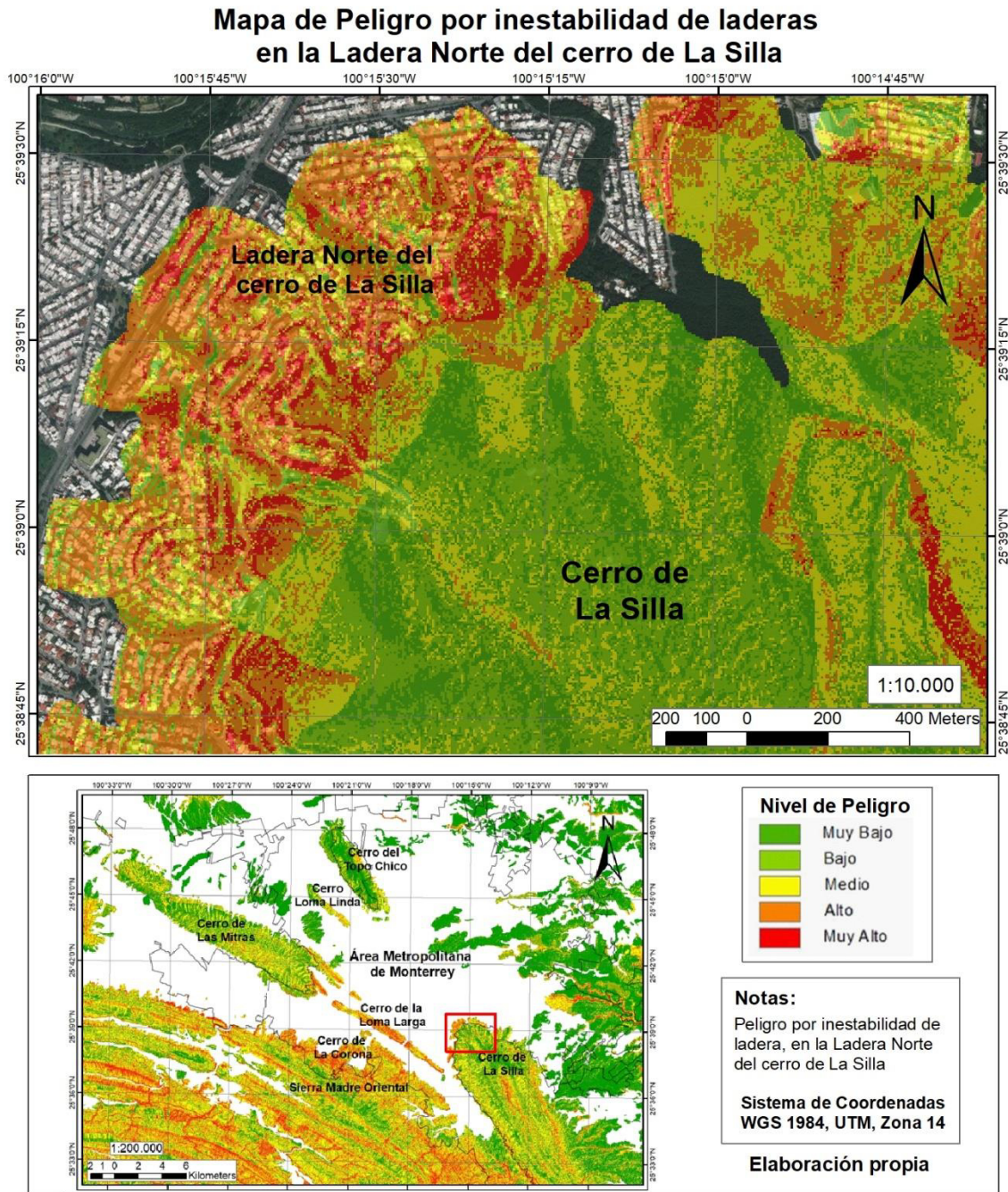
#### **4.3.2 Cerro de La Silla**

El cerro de La Silla se encuentra entre los municipios de Monterrey, Guadalupe y Juárez; fue decretado Como Área Natural Protegida en la categoría de Monumento Natural en 1991; sin embargo, el crecimiento de la población ha llevado la construcción de fraccionamientos en las laderas. En la Figura 4.21 se muestran imágenes de cómo se encuentran algunas zonas de este cerro, y en la Figura 4.22 se presentan los resultados del mapa de peligro en el cerro de La Silla.



*Figura 4.21. Laderas en el cerro de La Silla (tomada de Google Earth).*





*Figura 4.22. Mapa de peligro en las laderas norte del cerro de La Silla.*

En la imagen anterior se observan las laderas norte del cerro de La Silla, que presentaron peligro por inestabilidad de laderas en nivel medio, alto y muy alto, dentro del municipio de Guadalupe. En esas zonas hay casas habitación, comercios, infraestructura vial etc. En los recorridos por el cerro de La Silla, se apreciaron varios fraccionamientos residenciales y construcción de diversas casas,

para lo cual están deforestando algunas áreas verdes, extrayendo rocas del cerro y retirando materiales producto de las excavaciones, como lo muestra la Figura 4.23. SEMARNAT es la secretaria encargada de autorizar las actividades comerciales, recreativas, entre otras que puedan llevarse a cabo en este sitio, por medio de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.



*Figura 4.23. Construcción de casas en el cerro de la Silla.*

### **4.3.3 Cerro de Las Mitras**

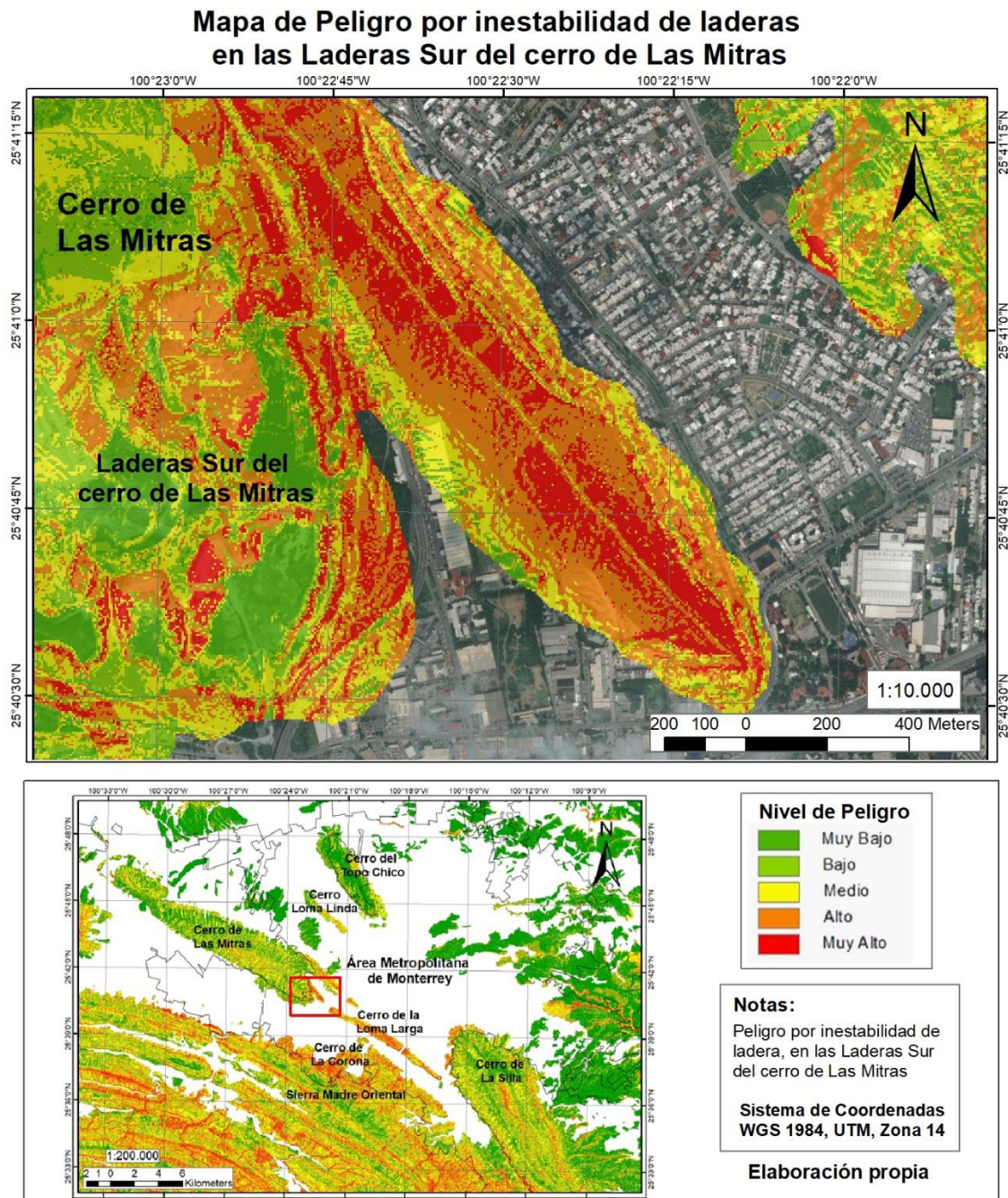
El cerro de Las Mitras se ubica entre los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García, Santa Catarina y García. En la Figura 4.24 se aprecia el cerro de Las Mitras, el que se está urbanizando a su alrededor.



*Figura 4.24. Vista panorámica del cerro de Las Mitras.*



La parte sureste del cerro de Las Mitras muestra la roca expuesta debido a las pedreras, de donde se extraían materiales. También se observa la presencia de residencias, edificios departamentales, infraestructura vial, comercios etc. En la Figura 4.25 se aprecia el mapa de peligro en la zona sur del cerro de Las Mitras; se observan niveles de peligro medio, alto y muy alto en los sitios antes mencionados.



*Figura 4.25. Mapa de peligro en las laderas sur del cerro de Las Mitras.*



En los recorridos en el campo, se encontraron excavaciones, construcción de fraccionamientos residenciales, vialidades, torres de edificios, retiro de material del cerro, roca expuesta y fracturada, filtraciones, escurrimientos, cortes en el cerro, y variedad en las pendientes, como en la topografía, debido a los asentamientos humanos, en la Figura 4.26 y 4.27 se muestran algunas imágenes de lo que se encontró en la visita de campo por el cerro de Las Mitras.



*Figura 4.26. Construcción de casas en el cerro de Las Mitras.*



*Figura 4.27. Urbanización en las faldas del cerro de Las Mitras.*



#### 4.3.4 Cerro de la Loma Larga

Entre los límites de Monterrey y San Pedro Garza García se encuentra el cerro de la Loma Larga. En la Figura 4.28 se muestra el mapa de peligro en parte de este cerro, en el que hay niveles medio, alto y muy alto de peligro, debido a su fuerte urbanización y demás factores que se vieron involucrados.

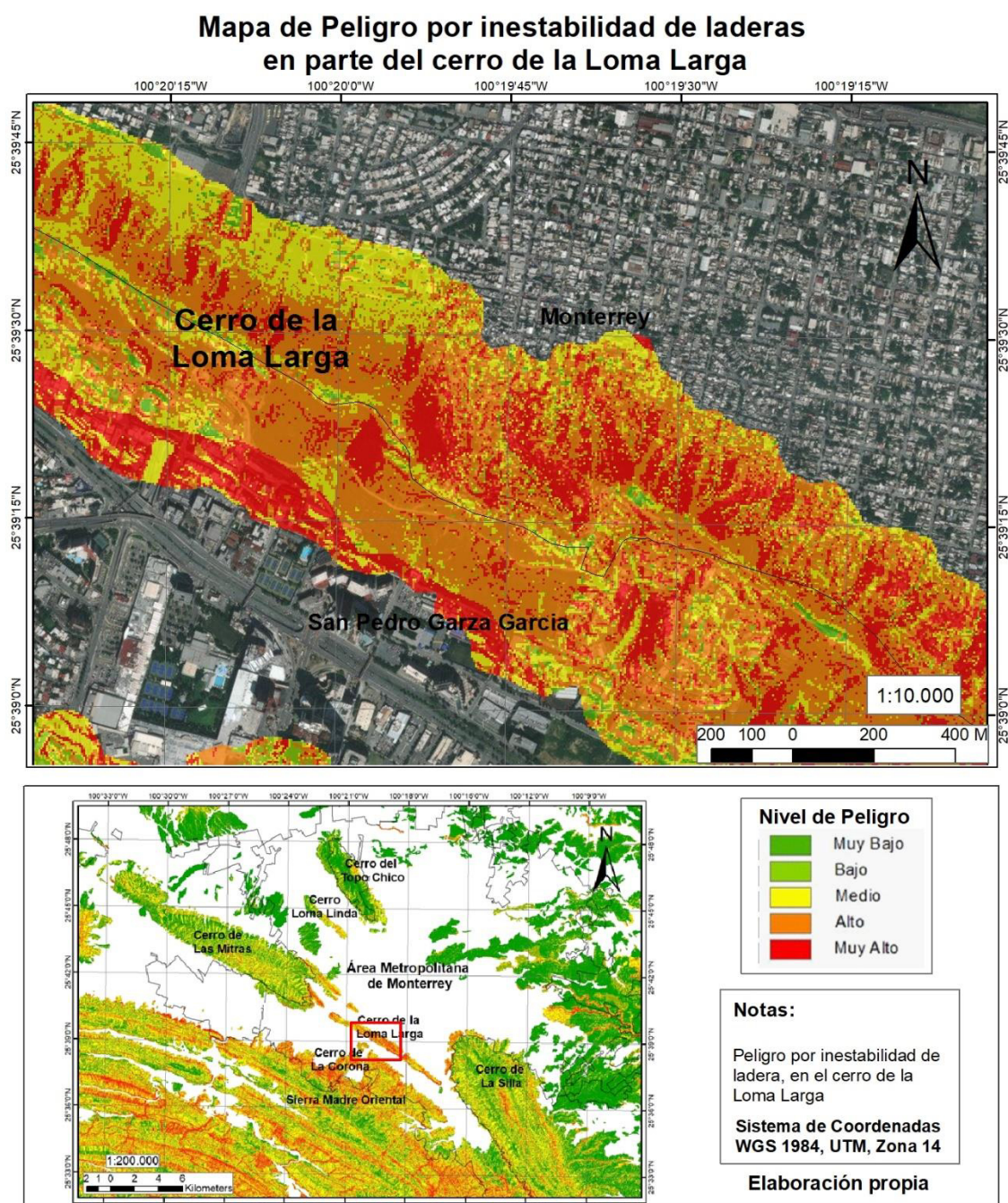


Figura 4.28. Mapa de peligro en el cerro de la Loma Larga.



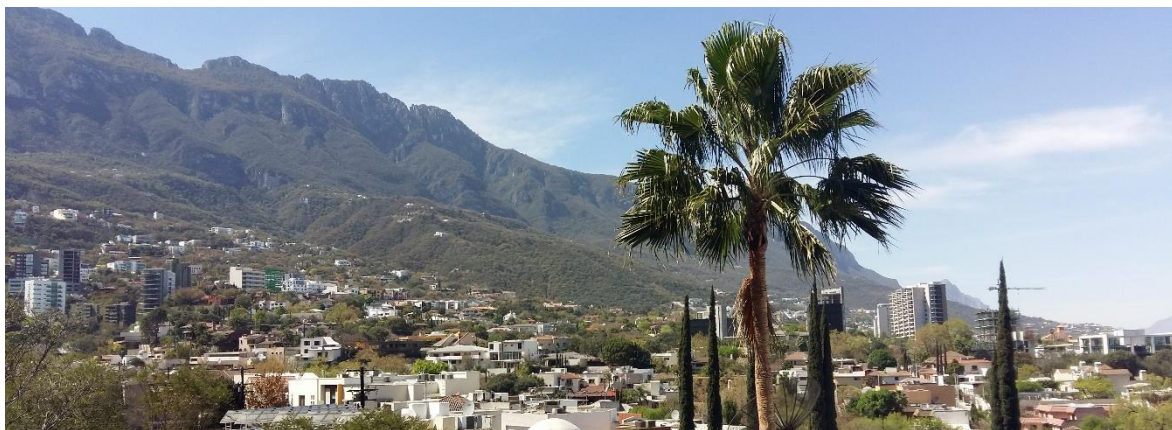
El cerro de la Loma Larga presenta un gran número de casa-habitación, en la cara norte dentro del municipio de Monterrey, algunos comercios y vialidades, entre otros. La cara sur del cerro presenta edificios departamentales y de oficinas, fraccionamientos residenciales, vialidades, etc., dentro del municipio de San Pedro Garza García, la Figura 4.29 muestra parte de ambas caras del cerro.



*Figura 4.29. Urbanización en el cerro de la Loma Larga.*

#### **4.3.5 Sierra Madre Oriental**

La Sierra Madre Oriental (SMO) abarca gran parte del país; dentro del AMM se tiene más entendido hacia el conjunto de montañas alineadas en la curvatura de Monterrey, teniendo presencia en los municipios de Santa Catarina, San Pedro Garza García y Monterrey; la Figura 4.30 muestra parte de la SMO.



*Figura 4.30. Urbanización en las faldas de la Sierra Madre Oriental.*



La Figura 4.31 muestra el mapa de peligro en parte de las laderas de la SMO, como lo es el cerro de La Corona, existen niveles de peligro medio, alto y muy alto, debido a diferentes factores, como las fuertes pendientes, el tipo de roca, que en esa zona son lutitas y caliza-lutitas; hay fallas y fracturas, zona urbanizada y escurrimientos, entre otros factores, que influyeron para obtener este resultado.

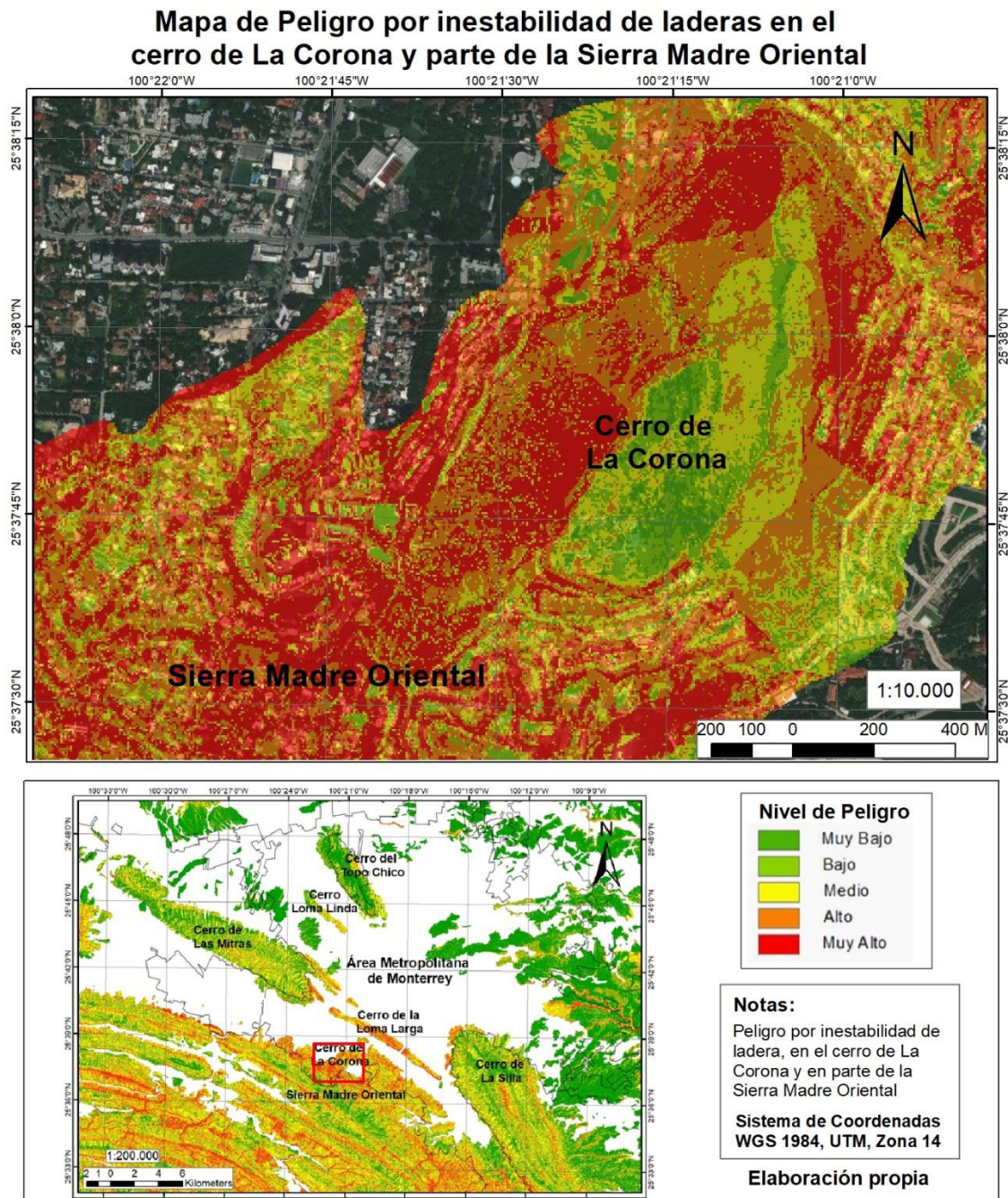
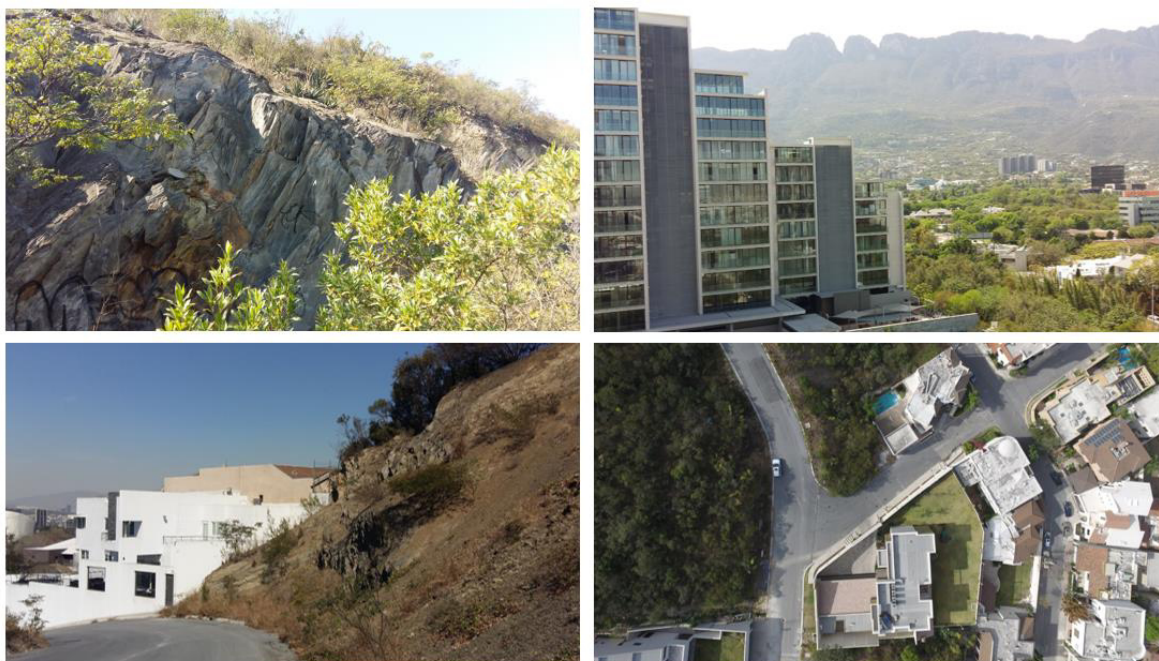


Figura 4.31. Mapa de peligro en las laderas de la Sierra Madre Oriental.

El municipio de San Pedro Garza García destaca por su crecimiento urbano y comercial, actualmente este crecimiento ha sido de forma vertical, debido al poco territorio que posee el municipio y a su colindancia con la SMO, y es por ello que existen residencias, comercios, vialidades, áreas verdes, centros recreativos, etc., en las laderas de la SMO, presentando diferentes niveles de peligro; en la Figura 4.32 se observa parte de la SMO en el municipio de San Pedro Garza García.

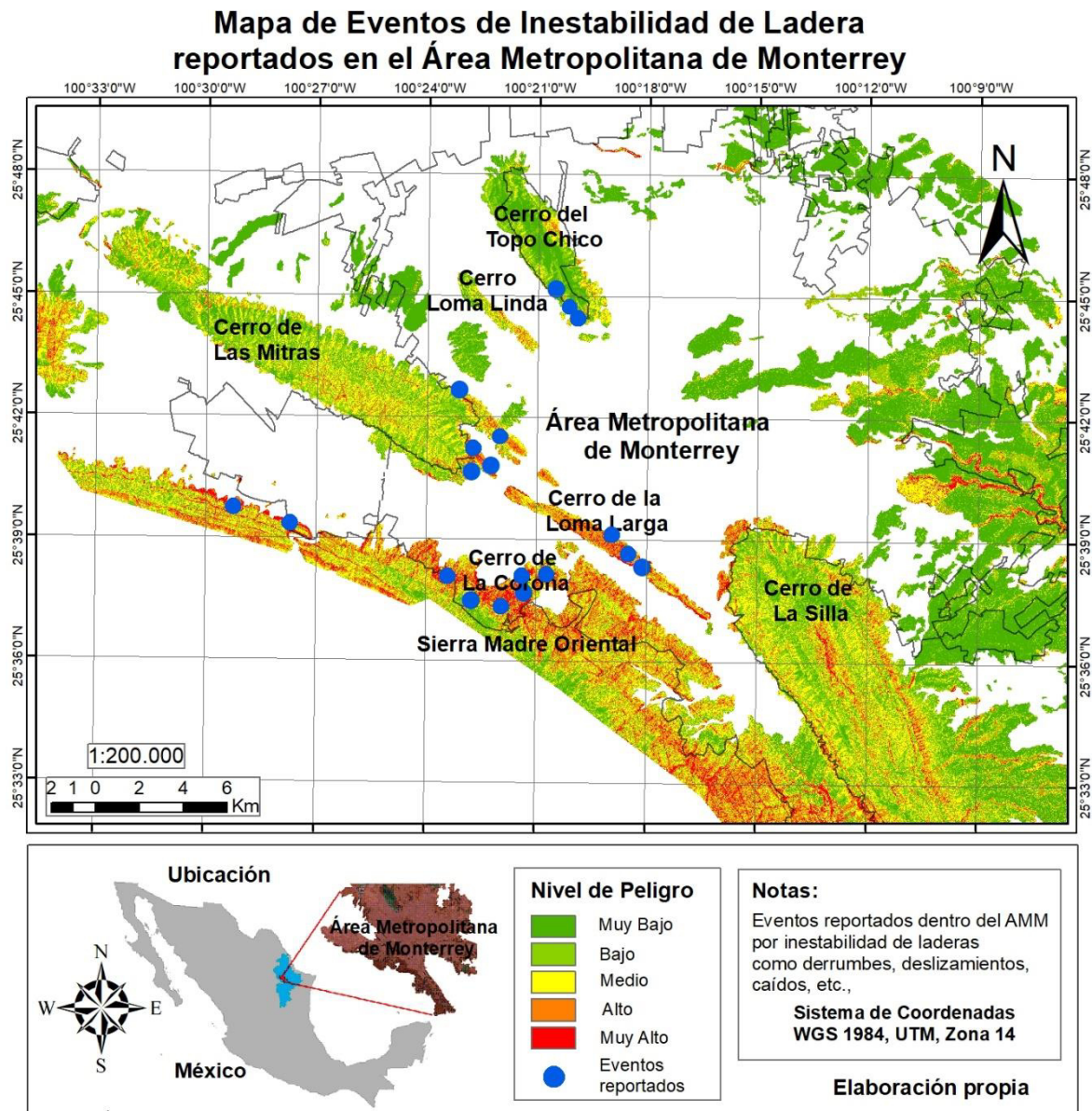


*Figura 4.32. Roca expuesta y urbanización en las faldas de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de San Pedro Garza García.*

#### **4.4 Validación del Modelo**

Con el modelo de peligro se debe de comprobar su confiabilidad, para ello se investigaron los derrumbes, caídos, deslizamientos y todo proceso referente a inestabilidad de laderas del cual se tuviera reporte. Es impórtate elaborar un mapa de los deslizamientos ocurridos y así poder determinar las zonas que pueden sufrir deslizamientos. La Figura 4.33 muestra los sitios donde se encontraron reportes de los diferentes procesos de inestabilidad de laderas en el AMM.





*Figura 4.33. Ubicación de los eventos de inestabilidad de ladera reportados dentro del AMM.*

En la figura anterior se aprecian varios sitios donde hay reportes de derrumbes, caídos, deslizamientos, deslaves, desprendimientos de rocas entre otros, mismos que se compara con los datos y resultados obtenidos del modelo de peligro para verificar la información producida junto con los recorridos en campo, que sirven para corroborar y validar el modelo de inestabilidad de Ladera.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

Con los resultados obtenidos se puede destacar que en el presente trabajo se utilizaron los SIG como herramienta en el desarrollo del modelo de peligro por inestabilidad de ladera. En la medida que la tecnología avance y los descubrimientos científicos estén al alcance, se pueden mejorar las técnicas para conocer y entender más en detalle los factores que influyen en los deslizamientos, los derrumbes, la estabilidad e inestabilidad de las laderas; evaluar el grado de amenaza, predecir procesos y riesgos geológicos, prevenir y tomar las medidas necesarias para evitar pérdidas humanas y daños materiales.

El Modelo Digital de Elevación utilizado para este modelo es de mayor resolución y aumenta la capacidad de predicción que los utilizados anteriormente. Los resultados obtenidos presentan mejor calidad que los documentos anteriormente publicados por otros autores, debido al formato utilizado, lo cual mejora la precisión de los sitios expuestos a peligro dentro del AMM. Esto sirve para tomar medidas de prevención en sitios específicos.

Las capas vectoriales utilizadas en escalas de 1:50,000 para representar pendientes, rumbos, landform, fallas, echados, litología, edafología, cobertura vegetal y orden hidrológico, sumado a la capa de precipitación, dan como resultado mayor precisión en los sitios que presentan alto y muy alto peligro.

Con los resultados del modelo se demuestra que las precipitaciones incrementan el peligro de inestabilidad de ladera. En el AMM las precipitaciones máximas registradas suelen ser pocas, pero de gran intensidad, lo cual aumenta el peligro influido por los demás factores geológicos y topográficos.

Los cambios en el ambiente y las modificaciones por actividades humanas son causas de los riesgos geológicos. Algunos factores que los provocan son los esfuerzos que actúan en las laderas debido a cortes por construcciones de diferente

tipo (edificaciones, vialidades, comercios, fraccionamientos, etc.). También influye el tipo de roca que presenta el sitio y los diferentes rasgos geológicos, las precipitaciones que para el AMM tienden a ser fuertes en periodos muy cortos de tiempo y los escurrimientos por las montañas y hacia los ríos.

La parte baja de las montañas dentro del AMM se encuentra en zona de peligro por inestabilidad de ladera, destacando áreas urbanizadas, infraestructura vial, comercios, sitios de esparcimiento, áreas verdes y viviendas, en los municipios de Monterrey, Santa Catarina, San Pedro Garza García, Santiago, San Nicolás de los Garza y Guadalupe.

Es necesario conocer este tipo de estudio para tomar las medidas preventivas necesarias, ya que, debido a las fuertes precipitaciones que se han registrado en el AMM, se tienden a generar inundaciones y en algunos casos derrumbes, ocasionando pérdidas humanas, daños materiales y fuertes gastos en la rehabilitación y construcción de las perdidas.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda que el presente trabajo y sus resultados sean considerados para que la autoridad pública tome las medidas necesarias que considere pertinente para disminuir el peligro de la población, en el marco de la actualización del Atlas de Riesgos y Peligros de Nuevo León.

Se recomienda evitar que se continúe con la urbanización en las zonas señaladas en la cartografía en color amarillo, anaranjado y rojo (zona de peligro medio, alto y muy alto), porque representan un peligro para la población, debido a que la mayoría de estos sitios se encuentran urbanizados.

Se recomienda revisar las zonas de mayor peligro y, según se necesite o lo indique algún experto optar por las medidas de remediación y saneamiento como:

- colocar barreras en el talud de los cerros, muros de contención, anclas, cables y mallas según lo requiera;

- concreto lanzado en zonas propensas a derrumbes;
- terrazas de absorción, zanjas de infiltración, sistemas de captación de aguas pluviales y de drenaje pluvial, mallas orgánicas y reforestación, entre otros sistemas que pueden apoyar.

Se recomienda revisar los sitios con pendientes fuertes, lugares con tipo de roca de menor resistencia, propensa a fracturarse o expuesta; áreas con escurrimientos hidrológicos y aplicar las medidas de mitigación más convenientes según el caso y con el criterio de los expertos, algunas técnicas a emplear son:

- reforestación con vegetación nativa en sitios con estructura masiva;
- lugares con fracturas deberán de mantenerse libres de vegetación con raíces profundas;
- en las zonas de peligro con desprendimientos se deberá realizar un monitoreo de ellos;
- los bloques de roca que se aprecie puedan caer, es preferible desprenderlos de forma manual tomando las debidas precauciones;
- los bloques mayores en peso y dimensión podrán anclarse con los materiales adecuados y en colaboración de los expertos;
- colocar muros de contención de mampostería o de concreto reforzado según lo requiera;
- revisar todas las filtraciones existentes en las rocas y de ser necesario colocar drenes.

De igual manera, se recomienda atender y revisar los planes de desarrollo urbano para evitar construir en zonas indebidas, estar actualizando los planes de desarrollo urbano según el periodo de gobierno, monitorear las zonas propensas a peligros y evitar asentamientos irregulares, así como los concesionados; saber orientar el rumbo del crecimiento tanto de la población, como de todos los servicios básicos.

## 6. REFERENCIAS

- Adame Rivera, L. M. (2013). *Urbanismo vulnerable a los procesos de remoción en masa en el municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León* (Tesis de maestría). Universidad Autonomas de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Nuevo León.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. NY, E.U.A.
- Ayuntamiento de Monterrey. (2014). *Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey 2013-2025*. Monterrey.
- Azteca 7 (2010). *Noticiero Info 7*. Obtenido de <http://www.info7.mx/a/noticia/205554>
- Azteca 7 (2013). *Noticiero Info 7*. Obtenido de <http://www.info7.mx/a/noticia/426591>
- Azteca 7 (2014). *Noticiero Info 7*. Obtenido de <http://www.movimet.com/2014/01/golpea-casas-roca-del-terror-hay-heridos/>
- Baeza, R. C., y Ayala, I. A. (2003). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*.
- Bitrán B. E. (2001). *Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres ocurridos en México en el período 1980-1999*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. México.
- Bocco, G., Sánchez, R. A., y Ricmann, H. (1993). Evaluación del Impacto de las Inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso Integrado de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica. *El Colegio de la Frontera Norte*.
- Bonachea Pico, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos* (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Burrough, P. A., y McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Reino Unido: Oxford University Press.
- CENAPRED (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. México: Centro Nacional de Prevención y Desastres.
- CENAPRED (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y Riesgos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, D.F.: Secretaría de Gobernación.
- CENAPRED (2010). *Atlas de riesgo para el estado de Nuevo León (Primera Etapa)*. Monterrey, NL, México, Secretaría de desarrollo sustentable.

- CENAPRED (2012). *Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos Hidrometeorológico. México, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos.*
- Centro de Información de las Naciones Unidas (2016). *Centro de Información de las Naciones Unidas. México, Cuba y República Dominicana.* Obtenido de Asuntos Humanitarios: <http://www.cinu.mx/temas/asuntos-humanitarios/>
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández del Castillo, T., El Hamdouni, R., Jiménez-Perálvarez, J., Alameda, P., Palenzuela, J. A. (2014). Urban Landslides at the South of Sierra Nevada and coastal areas of the Granada Province (Spain). *Proceedings of World Landslide Forum 3.*
- Chapa Guerrero, J. R. (2010). *Los Huracanes (riesgos naturales) como factor desencadenante de los riesgos geológicos del AMM, Nuevo León, México.*
- Chapa Guerrero, J. R., Méndez Delgado, S., Chávez Cabello, G., Chapa Arce, R. I., & Ibarra Martínez, S. E. (2016). Movimientos en masa, un riesgo geológico latente en el área metropolitana de Monterrey, N.L., México. *Ciencia UANL.*
- CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones. Comisión Nacional del Agua.* México, DF.
- CONAGUA. (2015). *Atlas del Agua en México 2015. Comisión Nacional del Agua.* México, DF.
- CONAGUA, SEMARNAT. (2013). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018.* Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MEXICO.
- Cremonini, R., Tiranti, D., & Barbero, S. (2015). The Urban Flooding Early Warning System of the Greater Turin (North-Western Italy) Based on Weather Radar Observations. *Spring International Publishing Switzerland.*
- Cuanalo, O. A., Quezada, P., Aguilar, A., Olivan, A. M., & Baradona, E. (2006). Sismos y Lluvias, Factores Detonantes de Deslizamientos de Laderas en las Regiones Montañosas de Puebla, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.*
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales.* Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Dragicevic, S., Lai, T., & Balram, S. (2014). GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International.*
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.*
- EM-DAT., U. C. (2005). *The OFda/CRED International Disaster database.* Obtenido de [www.emdat.be](http://www.emdat.be)
- EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain. (2015). *EM-DAT: The OFda/CRED International Disaster Database.*



Obtenido de [www.emdat.be](http://www.emdat.be), Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium);: [www.emdat.be](http://www.emdat.be)

ENCC (2013). *Estrategia Nacional del Cambio Climático Vision 10-2040*. México: Gobierno de la Republica.

Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (2016). *Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres*. Obtenido de <http://eird.org/esp/acerca-eird/marco-accion-esp.htm>

Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (2016). *Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja*. Obtenido de Preparandose para desastres: <http://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/preparandose-para-desastres/herramientas-de-preparacion-para-desastres-analisis-de-la-vulnerabilidad-y-la-capacidad-avc1/>

Fedorov, A. V., Brierley, C. M., & Kerry, E. (2010). Tropical Cyclones and Permanent El niño in the Early Pliocene Epoch. *Nature Publishing Group*.

García Gómez, J. (1998). *Los Desastres por lluvia un indicador de problemas en la relación, suelo y desarrollo urbano en Tijuana*. Tijuana, B.C.: El Colegio de la Frontera Norte, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Gobierno del estado de Tamaulipas (2011). *Atlas de Riesgo del Estado de Tamaulipas*. Tamaulipas.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Oruño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

Guerra Cobian, V. H. (1999). Construcción de las curvas Intensidad-Duración-Período de retorno a partir de lluvias máximas. *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil*.

Guevara E., Q. W. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, DF.

Gülersoy, A. E., & Çelîk, M. A. (2017). Determination of areas with high landslide risk in the province of kilis (Turkey) by multi-criteria decision making method. *Asos Journal*, 54-70.

Hernández Mena, Z. (2008). *Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: la región de Zapotitlan de Méndez, Puebla*. México.

Hinojosa Corona, A., Rodríguez Moreno, V., Munguía Orozco, L., & Meillón Menchaca, O. (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 15-38.

- INAFED (2017). *Enciclopedia de los Municipios de México*. Obtenido de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/>
- INEGI (1986). *Síntesis Geográfica del estado de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Mexico, D.F.
- INEGI (2005). *Anuario Estadístico de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2010a). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. SEDESOL, CONAPO, INEGI.
- INEGI (2010b). *Documento Técnico descriptivos de la Red Hidrográfica escala 1:50,000*. Instituto Nacional de estadística y Geografía. Aguascalientes: Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- INEGI (2014). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2014*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI (2015). *Anuario Estadístico de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2016a). *Cuéntame*. Obtenido de Información por entidad: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/nl/default.aspx?tema=me&e=19>
- INEGI (2016b). *Cuéntame*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/>
- INEGI (2016c). *INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA*. Obtenido de [http://www.beta.inegi.org.mx/inegi/quienes\\_somos.html](http://www.beta.inegi.org.mx/inegi/quienes_somos.html)
- Instituto Municipal de Planeación Urbana y Convivencia de Monterrey (2014). *Plan de Desarrollo Urbano Municipal de Monterrey 2013-2025*. Monterrey.
- IPPC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K.; Reisinger, A.)*. Ginebra, Suiza.
- Jaimes Téllez, M. A., Niño Lázaro, M. P., Reinoso Angulo, E., Avelar Frausto, C. E., & Huerta Garnica, B. (2008). Metodología para estimación de daño en la infraestructura por deslizamientos usando Sistemas de Información Geográfica. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Jiménez-Perálvarez, J. (2012). *Movimientos de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Granada, España): identificación, análisis y cartografía de susceptibilidad y peligrosidad mediante SIG (Tesis doctoral)*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Lugo Hubp, J., Cordero Estrada, M., & Zamorano Orozco, J. J. (1995). Relieve, Litología y Riesgos en la zona Urbana de la Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 52-67.

- Matías Ramírez, L. G. (1998). Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero. *Investigaciones geográficas*.
- Michalzik, D. (1988). *Trias bis tiefste Unter-Kreide der nordöslichen Sierra Madre Oriental, México*. Darmstad, Alemania.
- Montalvo Arrieta, J. C (2014). Entrevista con Eduardo Loredo Rivera. Obtenido de <http://www.uanlmexico.mx/noticias/actualidad/realidad/oportunidad/actividad-sismica-natural-en-nuevo-leon.html>
- .Munichre, M. R. (2015). *Munich Re*. Obtenido de <http://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html>.
- Murillo Sánchez, M. E. (2002). *Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la subcuenca 24Bf "Monterrey", aplicando un Sistema de Información Geográfica*. Monterrey, NL, México.
- Naciones Unidas (2014). *La situación demográfica en el mundo, 2014*. Nueva York.
- Naciones Unidas (2016). *Naciones Unidas*. Obtenido de Temas mundiales: <http://www.un.org/es/globalissues/population/>
- ONU HABITAT (2012). *Estados de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012*. Brasil: Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- Palacios Ortega, R., Martínez García, M., & Gutierrez Ávila, J. (2015). Planeación Urbana, Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos Hidrometeorológicos, en los espacios Periurbanos de Acapulco, Guerrero. *20° Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México*. Cuernavaca, Morelos.
- Perevochtchikova, M., & Lezama de la Torre, J. L. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 73-98.
- Quispe Medina, F. M. (2005). *Análisis de Susceptibilidad a la Ocurrencia de Deslizamientos en la Sierra de las Mitras, Utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. (Tesis de maestría), Monterrey.
- Saha A. k., G. R. (2010a). GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *Remote Sensing*.
- Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. (2002). GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *Int. J. Remote Sensing*, 357-369.
- Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. (2010b). GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *Int. J. Remote Sensing*, 357-369.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León (2012). Dictamen con el Atlas de Riesgo para el Estado de Nuevo León. *GACETA MUNICIPAL*.

- Serrano, D. J. (2007). Mapeo retrospectivo de experiencias internacionales como insumo para el análisis del tratamiento institucional del problema de la degradación de suelos. México: Instituto Nacional de Ecología.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga-Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez García, O. G. (2006). *Susceptibilidad a deslizamientos de laderas en las Sierra Madre Oriental*. Mexico, DF.
- Toimil, A. L. (2015). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. *RIBAGUA*.
- Torres Sánchez, S. A., Augustsson, C., Barboza Gudiño, R., Abratis, M., & Ramírez Fernández, J. A. (2015). Basamento paleozoico de la Sierra Madre Oriental: condiciones metamórficas de P-T en la presencia de fengita y clorita. *Ciencia UANL*.
- UNESCO (2011). *Manual de gestión de riesgos de desastre para comunicadores sociales*. Peru.
- Vázquez Aguirre, J. L. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. México: Insituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- WMO (2004). *WMO Statement on the status of the Global Climate in 2003, World Meteorological organization*.
- Xu, X., Wen, X., Yu, G., Chen, G., Klinger, Y., Hubbard, J., & Shaw, J. (2009). Coseismic reverse- and oblique-Slip surface faulting generated by the 2008 MW 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Geology*.
- Yopez Rincón, F., Lozano Garcia, D. F., Rivera Rivera, A. L., & Vela Coiffier, M. P. (2013). Evaluación de Impactos Hidrometeorológicos a lo largo del Río Santa Catarina (Monterrey, NL) empleando LiDAR Terrestre y Aéreo.

Juan Jose Aguilar Durán

Ingeniero Civil

M.C. con orientación en Ingenieria Ambiental

jjaguilard15@gmail.com